



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **MBR-TEKNIikka TASKILAN JÄTEVEDENPUHDISTAMOLLA**

Sofia Risteelä

YMPÄRISTÖTEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Tammikuu 2019



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **MBR-TEKNIikka TASKILAN JÄTEVEDENPUHDISTAMOLLA**

Sofia Risteelä

Ohjaajat:

Tiina Leiviskä

Jarmo Lahtinen

YMPÄRISTÖTEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Tammikuu 2019

# TIIVISTELMÄ

## OPINNÄYTETYÖSTÄ

Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Risteelä, Sofia		Työn ohjaaja yliopistolla Leiviskä T, TkT	
Työn nimi MBR-tekniikka Taskilan jätevedenpuhdistamolla			
Opintosuunta Teollisuuden energia- ja ympäristötekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Tammikuu 2019	Sivumäärä 112
Tiivistelmä			
<p>Oulun Veden Taskilan jätevedenpuhdistamolla otettiin käyttöön syksyn 2018 aikana MBR-tekniikkaa jätevedenpuhdistuksen tehostamiseksi sekä käsittelykapasiteetin lisäämiseksi. MBR eli kalvobioreaktori (englanniksi <i>membrane bioreactor</i>) on yhdistelmäprosessi, jossa aktiivilieteprosessin orgaanisen aineen poisto yhdistetään kalvosuodatuksen mekaaniseen lietteen poistoon. Taskilan MBR-yksikkö toimii perinteisen aktiivilieteprosessin rinnalla. Esiselkeytetystä vedestä noin 35 % käsitellään MBR-yksikössä ja loput perinteisessä aktiivilieteprosessissa. Tässä diplomityössä keskitytään kalvosuodatuksen ja MBR-tekniikkaan Taskilan jätevedenpuhdistamolla.</p> <p>Taskilan MBR-yksikkö muodostuu hienovälppäyksestä, kahdesta ilmastusaltaasta ja neljästä MBR-kalvosuodatuslinjasta. Kalvosuodatuksessa on käytössä onttokuitukalvot, joiden huokoskoko on 0,04 µm. Kalvojen kokonaissuodatuspinta-ala on liki 50 000 m<sup>2</sup>, jolloin MBR-yksikön keskivirtaama on 864 m<sup>3</sup>/h. MBR-linjojen keskivirtaama riippuu veden lämpötilasta. Talvikaudella veden lämpötilan ollessa alle 10 °C, MBR-linjat suodattavat virtaamalla 216 m<sup>3</sup>/h. Välikaudella sekä kesäkaudella veden lämpötilan ollessa yli 10 °C, linjakohtainen virtaama on 288 m<sup>3</sup>/h. Suodatuskäytössä olevien linjojen lukumäärää ohjataan MBR-yksikön virtauspyynnin sekä ilmastusaltaan pinnankorkeuden mukaan. Tällöin suodatuskäytössä on samanaikaisesti 2 – 4 MBR-linjaa.</p> <p>Kalvot ovat herkkiä isoille partikkeleille sekä mekaaniselle kulutukselle. Hienovälppäys on siten erityisen tärkeä vaihe MBR-yksikön alussa. Kalvojen puhtaanapito sekä likaantumisen ja tukkeutumisen ennaltaehkäisy ovat tärkeässä roolissa suodatuksen toimintatehokkuuden ylläpitämisessä. Suodatuksen aikainen kalvoilmastus sekä ajoittainen vastavirtahuuhtelu irrottavat kiintoainetta kalvojen pinnalta. Lisäksi MBR-linjoille suoritetaan kemiallisia pesuja. Ylläpitopesuja suoritetaan viikoittain 1 – 3 kertaa ja liuotuspesuja huoltotoimenpiteenä 1 – 2 kertaa vuodessa. Pesukemikaaleina voidaan käyttää natriumhypokloriittia tai sitruunahappoa.</p> <p>Käyttöänoton jälkeen loka-joulukuussa 2018 MBR-yksikön puhdistustulokset ovat olleet erittäin hyviä verrattuna lupaehtoihin sekä perinteisen aktiivilieteprosessin tuloksiin. MBR-lähtevä vesi on miltei kiintoainevapaata. Lisäksi fosfori, COD ja BOD ovat poistuneet todella tehokkaasti. Bakteerianalyysien perusteella kalvosuodatus poistaa tehokkaasti myös <i>E. coli</i> –bakteerit sekä suolistoperäiset enterokokit. Työssä käsitellään puhdistustuloksia kiintoaineen, kokonaisfosforin, kokonaistypen, COD<sub>Cr</sub>:n sekä BOD<sub>7ATU</sub>:n osalta. Lisäksi työssä esitellään bakteerianalyysijä sekä Euroopan päästörekisterin mukaiset analyysit.</p> <p>MBR on uusi tekniikka Suomen haastavissa ja muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa. Kevään kylmät sulamisvedet, kesäaikainen typenpoisto sekä syyssateet luovat omat haasteensa kalvosuodatukselle, mutta vaativat myös erilaisia ratkaisuja. Taskilan MBR-yksikön tulokset ja prosessin toiminta erilaisissa olosuhteissa ovat arvokasta kokemusta mahdollisille uusille MBR-laitoksille Suomessa ja Pohjoismaissa.</p>			
Muita tietoja			

# ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Environmental Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Risteelä, Sofia		Thesis Supervisor Leiviskä T, D.Sc. (Tech.)	
Title of Thesis MBR technology in Taskila wastewater treatment plant			
Major Subject Industrial Energy and Environmental Engineering	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date January 2019	Number of Pages 112
<p>Abstract</p> <p>Oulu Waterworks upgraded Taskila Wastewater Treatment Plant by installing MBR technology. During the autumn 2018 MBR technology was launched for more efficient wastewater treatment and increasing the plant capacity. Membrane bioreactor (MBR) is a combination process where the organic matter removal in activated sludge process is combined with the mechanical sludge removal in membrane filtration. In Taskila WWTP, the MBR unit operates alongside the conventional activated sludge process. Approximately 35 % of the pre-sedimented wastewater is treated in the MBR unit and rest in the conventional activated sludge process. This Master's Thesis is focused on membrane filtration and MBR technology in Taskila Wastewater Treatment Plant.</p> <p>Taskila MBR unit consists of fine screening, two aeration basins and four MBR trains. Hollow fiber membranes with the pore size of 0.04 µm are used in the filtration process. Total filtration area in Taskila MBR unit is almost 50 000 m<sup>2</sup> and the average daily flow of the MBR unit is 864 m<sup>3</sup>/h. The average daily flow of the individual MBR train is dependent on the water temperature. During the winter period (water temperature &lt; 10 °C), the average daily flow of the MBR train is 216 m<sup>3</sup>/h. During the interim period (water temperature 10 °C ≤ T &lt; 12 °C) and the summer period (water temperature ≥ 12 °C), the average daily flow of the MBR train is 288 m<sup>3</sup>/h. The number of trains in production is calculated based on the plant demand and the water level in aeration basins. There are 2 – 4 trains in production (filtrating) at the same time.</p> <p>Membranes are sensitive for large particles and mechanical wear. Fine screening is thus a particularly important step at the beginning of the MBR unit. Membrane cleaning and prevention of fouling and clogging play an important role in maintaining the efficiency of filtering. Solid matter can be removed from the membrane surface with constant membrane aeration and with backpulse. In addition, there are chemical cleanings for the membranes. Maintenance clean is done 1 – 3 times a week for every MBR train and recovery clean is done 1 – 2 times a year for each train. Sodium hypochlorite and citric acid can be used for the cleanings.</p> <p>After the commissioning in October – December 2018, purifying results of the MBR unit has been very good compared to requirements and results of the conventional activated sludge process. MBR permeate is almost free from suspended solids. In addition, phosphorus, COD and BOD have been removed extremely effectively. Based on the bacteria analysis, membrane filtration has removed <i>E. coli</i> and <i>enterococcus</i> –bacteria effectively from wastewater. In this Thesis, purifying results considering suspended solids, total phosphorus, total nitrogen, COD<sub>cr</sub> and BOD<sub>7ATU</sub> are presented. In addition, bacteria analysis and analysis for European Pollutant and Transfer Register are considered.</p> <p>MBR is a new technology in Finland and its challenging and changing climate. Cold melting waters in spring, total nitrogen removal in summer and the autumn rains create their own challenges for membrane filtration, but also require different solutions for the process. The results from the Taskila MBR unit and the operation of the process under different conditions will give valuable experiences for potential new MBR plants in Finland and in the Nordic countries.</p>			
Additional Information			

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu toukokuun 2018 ja tammikuun 2019 välisenä aikana Taskilan jätevedenpuhdistamon MBR-hankkeen yhteydessä. Työn tarkoituksena on esitellä kalvosuodatusta, MBR-tekniikkaa sekä sen puhdistustuloksia jätevedenpuhdistuksessa, erityisesti Taskilan jätevedenpuhdistamolla.

Haluan kiittää ohjaajaani Tiina Leiviskää kannustavasta ohjauksesta, tuesta ja palautteesta työn aikana. Erityiskiitokset Oulun Veden käyttöpäällikölle Jarmo Lahtiselle mielenkiintoisesta ja ainutlaatuisesta diplomityöpaikasta sekä tuesta työn edistyessä. MBR-tekniikan käyttöönotto kesän ja syksyn 2018 aikana tarjosi minulle arvokasta kokemusta ja tieto-taitoa niin kalvotekniikasta kuin uuden projektin kanssa työskentelystä. Haluan esittää kiitokset myös Oulun Veden tekniselle asiantuntijalle Juha Paakille opastuksesta, tuesta ja avusta MBR-hankkeessa sekä Taskilan puhdistamon toimintaan perehdyttämisestä. Kiitos Taskilan väki mahtavasta työilmapiiristä ja yhteistyöstä diplomityöni aikana.

Suuret kiitokset perheelleni ja läheisilleni tuesta ja kannustuksesta koko opiskelutaipaleeni aikana. Kiitos ystävilleni Prosen tipuille unohtumattomista hetkistä luennoilla, kirjastossa, kahvilassa, aularavintolassa ja munkkikerhon kokouksissa. Te olette olleet opiskelujen parasta antia.

Oulussa, 13.1.2019

Sofia Risteelä

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO .....	9
2 TASKILAN JÄTEVEDENPUHDISTAMO .....	10
2.1 Jätevedenpuhdistus .....	11
2.1.1 Tulopumppaus .....	12
2.1.2 Välppäys.....	12
2.1.3 Hiekanerotus.....	13
2.1.4 Flokkaus .....	13
2.1.5 Esiselkeytys .....	13
2.1.6 Ilmastus .....	14
2.1.7 Jälkiselkeytys.....	15
2.1.8 Jälkisuodatus .....	16
2.1.9 Purku mereen.....	16
2.1.10 Lähtevän veden desinfiointi .....	16
2.2 Lietteenkäsittely .....	17
3 TYPENPOISTO.....	18
3.1 Biologinen typenpoisto .....	18
3.1.1 Nitrifikaatio .....	19
3.1.2 Denitrifikaatio.....	20
3.2 Typenpoistoon vaikuttavia tekijöitä .....	21
3.2.1 Lämpötila .....	21
3.2.2 Happipitoisuus.....	23
3.2.3 pH ja alkaliteetti.....	23
3.2.4 Hiili-typin –suhde .....	24
4 KALVOSUODATUS.....	26
4.1 Kalvosuodatus vedenpuhdistuksessa .....	27
4.1.1 Mikro-suodatus .....	29
4.1.2 Ultra-suodatus.....	29
4.1.3 Nano-suodatus .....	30

4.1.4 Käänteisosmoosi.....	30
5 MBR – KALVOBIOREAKTORI.....	32
5.1 MBR-tekniikka.....	33
5.1.1 MBR-kalvomateriaalit .....	33
5.1.2 MBR-kalvotyypit.....	36
5.1.3 Kalvojen sijoittelu.....	37
5.2 MBR-tekniikka Suomen jätevedenpuhdistamoilla .....	39
6 MBR TASKILAN JÄTEVEDENPUHDISTAMOLLA .....	42
6.1 Taskilan MBR-yksikkö.....	43
6.1.1 ZeeWeed 500D –onttokuitukalvo.....	45
6.1.2 Kasetit ja modulit.....	46
6.1.3 MBR-linja .....	49
6.2 MBR-yksikön mitoituskuormitus .....	50
6.3 MBR-hanke ja käyttöönotto .....	52
7 TASKILAN MBR-YKSIKÖN PROSESSIKUVAUS.....	54
7.1 Hienovälvät .....	55
7.2 Ilmastusaltaat.....	56
7.2.1 Tuleva vesi .....	59
7.2.2 Ylijäämälietteen poisto .....	60
7.2.3 Pintalietteen poisto.....	60
7.2.4 Veden johtaminen kalvoaltaille .....	61
7.3 MBR-kalvosuodatus .....	62
7.3.1 Suodatussykli.....	63
7.3.2 Plant demand –laskenta.....	64
7.3.3 Standby-tila .....	65
7.3.4 Permeaattivirtaama .....	66
7.3.5 Mittaukset ja toimilaitteet .....	70
7.4 Kalvoilmastus.....	71
7.5 Tärkeimmät tunnusluvut .....	74
7.5.1 Vuo (J).....	74
7.5.2 Kalvopaine (TMP).....	74
7.5.3 Permeabiliteetti (MK) .....	76
7.5.4 Kokonaisvastus ( $R_T$ ) .....	77
7.6 Kalvojen likaantuminen ja puhtaanapito .....	78
7.6.1 Ylläpitopesu.....	80
7.6.2 Liuotuspesu .....	82

7.7 Kunnossapito .....	83
7.7.1 TTF-testi.....	84
7.7.2 Kuplatesti .....	86
7.7.3 Kuitujen paikkaaminen .....	88
8 PUHDISTUSTULOKSIA .....	89
8.1 Omavalvonta-analyysit .....	89
8.1.1 BOD <sub>7ATU</sub> ja COD <sub>cr</sub> .....	92
8.1.2 Kiintoaine .....	94
8.1.3 Kokonaisfosfori .....	95
8.1.4 Kokonaistyyppi.....	96
8.2 Bakteerianalyysit .....	98
8.3 E-PRTR.....	102
9 YHTEENVETO .....	105
LÄHTEET .....	108



## MERKINNÄT JA LYHENTEET

ADF	permeaatin keskivirtaama (average daily flow)
BOD	biologinen hapenkulutus (biological oxygen demand)
COD	kemiallinen hapenkulutus (chemical oxygen demand)
DN	denitrifikaatio-nitrifikaatio
E-PRTR	Euroopan päästörekisteri (European Pollutant and Transfer Register)
J	vuoto (flux)
LeapHi	korkea kalvoilmastuksen tarve
LeapLo	matala kalvoilmastuksen tarve
M2DF	permeaatin maksimivirtaama (maximum two daily flow)
MBR	kalvobioreaktori (membrane bioreactor)
MC	ylläpitopesu (maintenance clean)
MK	permeabiliteetti (kalvon läpäisykyky)
MKT	lämpötilakorjattu permeabiliteetti
PAC	polyalumiinikloridi (esisäostuskemikaali)
PFA	permuurahaishappo
PHF	permeaatin hetkellinen maksimivirtaama (peak hourly flow)
PIX	ferrisulfaatti (jälkisaostuskemikaali)
PVDF	polyvinyylideenifluoridi (kalvomateriaali)
$R_c$	kakun vastusarvo (cake resistance)
$R_i$	alkutilanteen vastusarvo (initial resistance)
$R_T$	kokonaisvastus
RC	liuotuspesu (recovery clean)
TTF	suodattavuustesti (Time to Filter)
TMP	kalvopaine-ero (transmembrane pressure)

# 1 JOHDANTO

Jätevedenpuhdistuksessa kalvobioreaktori eli MBR-tekniikka (*membrane bioreactor*) yhdistää biologiseen aktiivilieteprosessiin perustuvan orgaanisen aineen poiston sekä kalvosuodatuksen perustuvan mekaanisen lietteen erottamisen. MBR-tekniikan hyödyntäminen jätevedenpuhdistuksessa on yleistynyt viime vuosina maailmalla, etenkin Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Suomessa ja muissa Pohjoismaissa MBR-tekniikkaa ei ole vielä laajalti käytössä. MBR-tekniikka on osoittanut puhdistustehokkuutensa jätevedenpuhdistamoilla, joten kiinnostus Suomessa tekniikkaa kohtaan on herännyt. Aktiivilieteprosessin sekä kalvosuodatuksen yhdistelmäprosessissa voidaan jätevedestä poistaa tehokkaasti BOD:a, COD:a, kiintoaineita, typen yhdisteitä ja kokonaistyppeä sekä kokonaisfosforia.

Oulun Veden Taskilan jätevedenpuhdistamolla käynnistettiin syksyn 2018 aikana MBR-yksikkö perinteisen aktiivilieteprosessin rinnalle käsittelykapasiteetin lisäämiseksi sekä jätevedenpuhdistuksen tehostamiseksi. Taskilan MBR-yksikköön johdetaan osa esiselkeytetystä jätevedestä hienovälppien läpi ilmastusaltaiden aktiivilieteprosessiin sekä edelleen MBR-kalvosuodatuksen, minkä jälkeen puhdistettu jätevesi voidaan johtaa suoraan mereen. Suomessa haastavat ilmasto-olosuhteet, jätevedenkäsittelyn erityispiirteet, tiukat lupaehdot sekä kevään kylmät sulamisvedet luovat omat haasteensa MBR-tekniikan käytölle. Tämän seurauksena Taskilan MBR-yksikön prosessissa on tehty omanlaiset ratkaisut Suomen olosuhteisiin ja vaatimuksiin.

MBR on Suomessa uusi tekniikka, joten tässä diplomityössä esitellään kalvosuodatusta ja MBR-tekniikkaa yleisesti jätevedenpuhdistuksessa. Lisäksi työn tarkoituksena on kuvata erityisesti Taskilan jätevedenpuhdistamon MBR-yksikön prosessiratkaisuja sekä toimintaa. Työssä esitellään MBR-yksikön puhdistustuloksia loka-joulukuulta 2018. Puhdistustuloksissa käsitellään Oulun Veden omavalvontalaboratorion analyysijä jätevedenpuhdistamon lupaehtoja koskevista yhdisteistä: BOD, COD, kiintoaine, kokonaisfosfori ja kokonaistyppeä. Lisäksi puhdistustuloksiin on otettu mukaan bakteerianalyysijä sekä Euroopan päästörekisterin mukaiset analyysit. Puhdistustulosten avulla pyritään esittelemään MBR-tekniikan puhdistustehokkuus sekä verrata niitä perinteisen aktiivilieteprosessin tuloksiin.

## 2 TASKILAN JÄTEVEDENPUHDISTAMO

Taskilan jätevedenpuhdistamolle johdetaan yhdyskuntajätevesiä, pienen ja keskisuuren teollisuuden jätevesiä sekä hulevesiä Oulun kaupungin, Muhoksen, Utajärven, Iin, Haukiputaan, Kiimingin ja Ylikiimingin alueilta. Taskilassa otetaan vastaan myös sako- ja umpikaivolietettä. Vuonna 2017 Taskilassa puhdistettiin yhteensä 17 437 133 m<sup>3</sup> jätevettä. Siirtoviemäreiden kautta Muhokselta ja Utajärveltä johdettiin jätevesiä Taskilaan 585 178 m<sup>3</sup> ja Iistä 269 975 m<sup>3</sup>. (Aluehallintovirasto 2017, Oulun Vesi 2018)

Taskilan jätevedenpuhdistamolla jätevedet käsitellään ensin mekaanisesti ja kemiallisesti, jonka jälkeen jätevesi johdetaan biologiseen käsittelyyn aktiivilieteprosessiin sekä edelleen jälkisuodatukseseen. Jälkisuodattimien jälkeen puhdistettu vesi johdetaan 900 metriä pitkää purkuputkea pitkin Perämereen. Jätevedestä poistettava liete käsitellään kemiallisesti jätevedenpuhdistamolla KemiCond-prosessissa, jonka jälkeen liete kuivataan linkouksella, välivarastoidaan kahdessa siilossa ja ohjataan edelleen jatkokäyttöön. Kuivattu liete kuljetetaan kompostoitavaksi Haukiputaan Vasikkasuolle aumakompostointialueelle. Lisäksi lietettä voidaan toimittaa sellaisenaan pelloille ja maanparannusaineeksi Eviran myöntämien lupien mukaisesti sekä lähialueen biokaasulaitoksiin. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2018)

Jätevedenpuhdistus on aloitettu Taskilassa vuonna 1973, jolloin laitos perustui kemialliseen jätevedenpuhdistukseen. Laitosta laajennettiin vuonna 1998 rakentamalla biologinen käsittelyprosessi kemiallisen käsittelyvaiheen perään. Laajennus jatkui edelleen vuonna 2004, jolloin rakennettiin 2-linjainen aktiivilieteos, joka koostuu ilmastus- sekä jälkiselkeytysaltaista. Vuonna 2008 typenpoistovaatimusten kiristytessä rakennettiin kolmas aktiivilietelinja edellisten linjojen rinnalle. Lisäksi tehtiin muutoksia alkuperäisiin aktiivilietelinjoihin, jotta ne soveltuisivat kokonaistypenpoistoon denitrifikaatio-nitrifikaatio –prosessissa (DN-prosessi). Tällöin laitokselle rakennettiin myös kalkin, metanolin sekä glykolin vastaanotto- ja annostelujärjestelmät. Vuodesta 2008 lähtien Oulun Vedellä on ollut palvelusopimus Ilmailulaitoksen kanssa Oulun lentoaseman glykolivesien käsittelystä Taskilan jätevedenpuhdistamolla aikavälillä 1.11.2008 – 31.10.2023. Vuosina 2013 – 2014 laitokselle rakennettiin tasausallas. Lisäksi esikäsittelyä saneerattiin kapasiteetin nostamiseksi ja toiminnan varmistamiseksi. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

Taskilan jätevedenpuhdistamon ympäristöluvassa on määritetty raja-arvot  $BOD_{7ATU}$ :lle, kokonaisfosforille sekä kokonaistypelle mereen johdettaville jätevesille (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2004). Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä (888/2006) asettaa raja-arvot lisäksi  $COD_{cr}$ :lle ja kiintoaineelle (Ympäristöministeriö 2006). Jätevedenpuhdistuksessa on päästävä seuraaviin puhdistustehoihin ja mereen johdettavien jätevesien pitoisuudet eivät saa ylittää seuraavia raja-arvoja (taulukko 1):

Taulukko 1. Jätevedenpuhdistusta koskevat raja-arvot

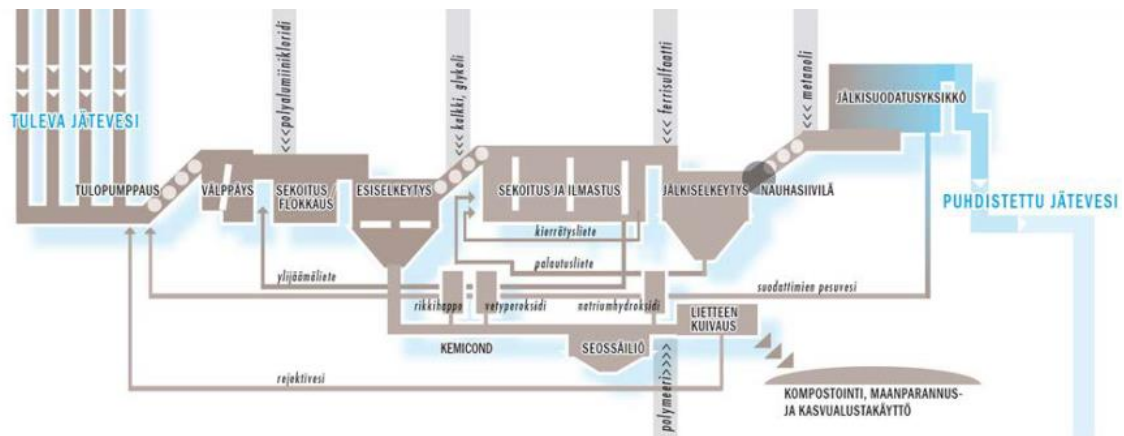
Lupaehdot	Puhdistettu jätevesi	Puhdistusteho
$BOD_{7ATU}$	$\leq 15 \text{ mgO}_2/\text{l}$	$\geq 90 \%$
Kokonaisfosfori	$\leq 0,5 \text{ mgP/l}$	$\geq 90 \%$
$COD_{cr}$	$\leq 125 \text{ mgO}_2/\text{l}$	$\geq 75 \%$
Kiintoaine	$\leq 35 \text{ mgSS/l}$	$\geq 90 \%$
Kokonaistyyppi	$\leq 20 \text{ mgN/l}$	$\geq 70 \%$

Typenpoistoa koskevat raja-arvot ovat voimassa silloin, kun prosessilämpötila ( $T_{pros}$ ) on yli  $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jätevedenpuhdistamon tulee saavuttaa raja-arvot  $BOD_{7ATU}$ :n ja kokonaisfosforin osalta neljännesvuosikeskiarvoina, joissa otetaan huomioon myös mahdolliset ohijuoksutukset ja poikkeustilanteet. (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto 2004) Kiintoaineen ja  $COD_{cr}$ :n osalta jätevedenpuhdistamolla tulee saavuttaa edellä olevat raja-arvot näytekohteisesti siten, että mahdollisia raja-arvojen ylityskertoja sallitaan suhteessa näytteiden lukumäärään vuoden aikana (Ympäristöministeriö 2006).

## 2.1 Jätevedenpuhdistus

Taskilan jätevedenpuhdistamolle mitoitusvirtaama on  $2\,500 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $60\,000 \text{ m}^3/\text{vrk}$ ). Aktiivilieteosalle mitoitusvirtaama on  $2\,700 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $64\,800 \text{ m}^3/\text{vrk}$ ) sekä jälkisuodatusyksikölle  $2\,200 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $52\,800 \text{ m}^3/\text{vrk}$ ). Vuorokauden keskivirtaama

laitokselle on noin 50 000 m<sup>3</sup>/vrk. (Oulun Vesi 2012) Laitoksen prosessikaavio ennen typenpoiston tehostamista MBR-yksiköllä on esitettyä kuvassa 1.



Kuva 1. Taskilan jätevedenpuhdistamon prosessikaavio

Jäteveden virtaama laitokselle vaihtelee vuorokauden- ja vuodenaikojen mukaan. Yöllä pumppaamon kerätessä vettä virtaama on 400 l/s, kun päivällä ja illalla keskivirtaama on 700 l/s. Rankkasateella laitokselle tuleva virtaama voi olla 1 200 l/s. Keväällä sulamisvedet nostavat virtaamaa.

### 2.1.1 Tulopumppaus

Laitokselle tuotavat sako- ja umpikaivolietteet johdetaan sakokaivolietteen vastaanottoasemalta tuloviemäriin. Vuonna 2017 puhdistamo otti vastaan 20 994 m<sup>3</sup> sako- ja umpikaivolietettä. Tuleva jätevesi pumpataan tuloaltaasta laitokselle puhdistusprosessiin ruuvipumpuilla. Ruuvipumppuja on kolme, joista yleensä yksi on käytössä ja kaksi varalla. Kaksi ruuvipumppua ovat halkaisijaltaan 1,8 m ja pituudeltaan 11 m. Niiden nostokapasiteetti on noin 1 000 l/s eli 3 600 m<sup>3</sup>/h. Kolmannen ruuvipumpun halkaisija on 2,2 m, pituus 11 m ja nostokapasiteetti 1 250 l/s eli 4 500 m<sup>3</sup>/h. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

### 2.1.2 Välppäys

Jätevesi välpätään kolmella levynauhavälppällä, jolloin jätevedestä erotetaan karkein kiintoaines. Välppien reikäkoko on 6 mm ja jokaisen välppän kapasiteetti on 625 l/s (2 250 m<sup>3</sup>/h). Erotettu välpe käsitellään kahdella välpepesurilla, jonka jälkeen pesty välpe siirretään välpekonttiin. Pestyä ja puristettua välpettä syntyi vuonna 2017 noin 170 tonnia, keskimäärin 0,5 tonnia päivässä. Erotettu välpe kuljetetaan Laanilan

ekovoimalaitokselle polttoaineeksi. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012; Oulun Vesi 2018)

### **2.1.3 Hiekanerotus**

Välppäyksen jälkeen jätevesi johdetaan ilmastettuun hiekanerotukseen. Hiekanerotus on 2-linjainen molempien altaiden tilavuuden ollessa 285 m<sup>3</sup>. Hiekanerotusaltaan pohjalle laskeutunut hiekka-vesi-seos siirretään pohjalla liikkuvalla laahalla altaan tulopäätyyn, josta se pumpataan hiekanerottimen ja hiekkapesurin kautta hiekkalavalle. Hiekanerotuksen yhteydessä on myös rasvan- ja öljynerotuskaivo. Hiekka-vesi-seoksesta erotettu vesi johdetaan takaisin puhdistusprosessiin ja hiekkalavan hiekka tyhjenetään keskimäärin kerran viikossa. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

### **2.1.4 Flokkaus**

Hiekanerotuksen jälkeen jätevesi johdetaan 2-linjaiseen flokkaukseen. Flokkausaltaiden tilavuus on 130 m<sup>3</sup> ja molemmissa altaissa on kaksi pystyhämmennintä. Flokkauksen tarkoituksena on tehostaa flokkien muodostumista ja ylijäämälietteen sekoittumista ennen esiselkeytystä. Taskilassa esisaostuskemikaalina käytetään polyalumiinikloridia (PAC). Nestemäisen PAC:n syöttöpiste on ennen hiekanerotusta ja sen annostelu tapahtuu automaattisesti jätevesivirtaaman perusteella. Jätevesivirtaaman mittaus tapahtuu venturin avulla ennen hiekanerotusta. Tarvittaessa flokkautumista voidaan parantaa lisäämällä esiselkeytyksen polymeeriä (kationinen polyakryyliamiini) flokkauksen alkuvaiheessa. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

### **2.1.5 Esiselkeytys**

Sekoituksen ja flokkauksen jälkeen vesi johdetaan kahteen esiselkeytysaltaaseen. Esiselkeytysaltaiden halkaisija on 40 m, pinta-ala 1 250 m<sup>2</sup> ja tilavuus 3 800 m<sup>3</sup>. Vesi johdetaan esiselkeytysaltaaseen altaan keskeltä. Pohjalle laskeutuva ylijäämäliete ohjataan pohjalaahalla altaan keskelle lietetaskuun, josta se pumpataan KemiCond-lietteenkäsittelyyn. Pintaliete johdetaan pintalietekaivoon, josta se pumpataan tulopumppaamoon ja takaisin jätevedenpuhdistusprosessin alkuun. Esiselkeytetty vesi poistuu ylivuotona kohti ilmastusaltaita. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

### 2.1.6 Ilmastus

Esiselkeytetty vesi pumpataan kahdella ruuvipumpulla kolmeen tulppavirtaukseen perustuvaan ilmastusaltaaseen sekä uuteen MBR-yksikköön. Ruuvipumppujen halkaisija on 2 m ja pituus 10,5 m. Yhden ruuvipumpun nostokapasiteetti on 4 500 m<sup>3</sup>/h. Ilmastusaltaihin menevään veteen syötetään tarvittaessa kalkkia pH:n säätämiseksi ja typenpoiston ylläpitämiseksi. Lisäksi lentokentältä tuotava glykoli voidaan syöttää veteen ennen ilmastusta. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

Ilmastusaltaat ovat suorakaiteen muotoisia, joiden syvyys on 6 m ja tilavuus 5 000 m<sup>3</sup>. Jokainen ilmastusallas on jaettu kuuteen lohkokon väliseinien avulla. Lohkot 1 – 3 ovat tilavuudeltaan 830 m<sup>3</sup>, lohko 4:n tilavuus on 1 250 m<sup>3</sup>, lohko 5:n 1 050 m<sup>3</sup> ja lohko 6:n 200 m<sup>3</sup>. Ilmastusaltaiden pohjalla, lohkoissa 1 – 5, on yhteensä 6 749 kappaletta ilmastinlautasia, joiden läpi johdetaan ilmakompressoreilla (yhteensä 4 kappaletta) tuotettu ilma altaihin. Ilmastusaltaiden lohkoissa 1, 2 ja 6 tapahtuu sekoitusta. Lohkoissa 1 ja 2 on kaksi kappaletta 2-lapaisia sekoittimia, joiden halkaisija on 2 900 mm. Lohkossa 6 on kaksi kappaletta 3-lapaisia sekoittimia, joiden halkaisija on 1 650 mm. Ilmastusaltaiden lohkojen 1 ja 2 toimintaa voidaan muuttaa prosessin ajotavasta riippuen (esimerkiksi typenpoiston aikana) hapelliseksi tai hapettomaksi (anoksinen). Lohkot 3 – 5 toimivat aina hapellisina ja lohko 6 on deoksinen lohko, jossa kierrätyslietteestä poistetaan ilma. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012) Taulukossa 2 on koottuna ilmastusaltaiden yksityiskohdat.

Taulukko 2. Ilmastusaltaiden 1-3 lohkojen varustus

Lohko	Tilavuus [m <sup>3</sup> ]	Tila	Ilmastus	Sekoitus
1	830	anoksinen/ hapellinen	kyllä	kyllä
2	830	anoksinen/ hapellinen	kyllä	kyllä
3	830	hapellinen	kyllä	ei
4	1 250	hapellinen	kyllä	ei
5	1 050	hapellinen	kyllä	ei
6	200	deoksinen	ei	kyllä
Yhteensä	5 000			

Ilmastusaltaissa ylläpidetään bakteerikantaa, joka poistaa kiintoaineita ja kesäisin typpeä (kun  $T_{\text{pros}} > 12\text{ °C}$ ). Altaissa kasvaa ja elää aerobisia sekä anaerobisia mikro-organismeja. Aerobisille mikro-organismeille luodaan kasvualustaksi hapelliset olosuhteet ilmastuksella. Vastaavasti anaerobisille mikro-organismeille luodaan hapettomat olosuhteet sekoituksella. Taskilan jätevedenpuhdistusprosessi on DN-prosessi (denitrifikaatio-nitrifikaatio). Ilmastusaltaan hapettomissa olosuhteissa (lohkoissa 1 ja 2) nitraatti ja nitriitti pelkistetään typpikaasuksi (denitrifikaatio). Aerobisissa olosuhteissa (lohkoissa 3 – 5) ammoniakki hapetetaan nitriitiksi ja edelleen nitraatiksi (nitrifikaatio). Lietettä kierrätetään ilmastusaltaiden lopusta niiden alkuun (kierrätysliete), jotta saavutetaan haluttu lieteikä ja bakteerikanta. Osa lietteestä (ylijäämäliete) poistetaan altaista lohkoista 5, mistä se johdetaan prosessiin ennen hiekanerotusta tai flokkauksen jälkeen. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

### 2.1.7 Jälkiselkeytys

Ilmastusaltaista vesi johdetaan kolmeen jälkiselkeytysaltaaseen. Ennen jälkiselkeytystä veteen syötetään jälkisaostuskemikaalia. Taskilassa jälkisaostuskemikaalina käytetään nestemäistä ferrisulfaattia (PIX), jonka annostus toteutetaan automaattisesti jätevesivirtaaman mukaan. Tarvittaessa lietteen laskeutuvuutta parannetaan käyttämällä jälkiselkeytyksen polymeeriä (kationinen polyakryyliamiini). Saostuskemikaaleilla saadaan aikaan kiintoaineen saostuminen sekä laskeutuminen. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

Jälkiselkeytysaltaat ovat halkaisijaltaan 43 metriä, niiden pinta-ala on  $1\,450\text{ m}^2$  ja tilavuus noin  $6\,650\text{ m}^3$ . Jälkiselkeytyksen tarkoituksena on erottaa ilmastusaltaaseen palautettava liete, jotta saavutetaan suuri ja valikoitunut mikrobipopulaatio. Palautusliete laskeutuu jälkiselkeytysaltaiden pohjalle, josta pohjalaaha ohjaa lietteen altaan keskelle pohjataskuun, mistä se pumpataan edelleen ilmastusaltaiden ensimmäisen lohkon sekoituskammioon. Jälkiselkeytysaltaan pinnalle nouseva pintaliete johdetaan pintalietekaivoon, josta se johdetaan takaisin jätevedenpuhdistusprosessin alkuun välpille menevään jäteveeteen. Jälkiselkeytetty vesi poistuu ylivuotona kohti jälkisuodatusta. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)



### 2.1.8 Jälkisuodatus

Jälkiselkeytyksestä tuleva vesi kulkee hienoväljän (reikäkoko 3 mm) läpi, jotta jälkiselkeytyksestä karkaavat epäpuhtaudet eivät pääse suodattimille. Vesi nostetaan jälkisuodatusaltaisiin kahdella ruuvipumpulla. Ruuvipumppujen halkaisija on 1,8 metriä ja pituus noin 11 metriä molempien kapasiteetin ollessa 2 880 m<sup>3</sup>/h. Jälkisuodatus koostuu kuudesta jälkisuodatusaltaasta, jotka toimivat itsenäisinä allasyksikköinä. Yhden jälkisuodatusaltaan pinta-ala on 38,8 m<sup>2</sup> ja tilavuus 150 m<sup>3</sup>. Taskilassa jälkisuodatuksessa on käytössä Degremontin BIOFOR C suodattimet, joissa suodatinpatjana on noin 4 metriä paksu lecasorakerros (rakeen halkaisija on noin 3 mm). (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

Talviaikaan, kun prosessiveden lämpötila on alle 12 °C, jälkisuodatus toimii fysikaalisena jälkikäsittely-yksikkönä, jossa erotetaan jälkiselkeytyksestä tulevasta vedestä kiintoainesta. Kun prosessiveden lämpötila on yli 12 °C ja typenpoisto on käynnissä, jälkisuodatus toimii myös biologisena jälkidenitrifikaatioyksikkönä. Tällöin typenpoiston tehostamiseksi jälkisuodatukseen syötetään metanolia denitrifikaation hiililähteeksi. Metanoli johdetaan suodatinsoluihin menevään veteen. Hiililähteeksi voidaan myös syöttää lentokentältä tuotavaa glykolia. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

### 2.1.9 Purku mereen

Taskilan jätevedenpuhdistamolla käsitellyt jätevedet johdetaan purkukaivoon ja sieltä edelleen purkuputkea pitkin Perämereen. Purkuputken pituus on noin 900 metriä ja halkaisija 1,4 metriä. Purkupaikka on Perämeren pohjassa 6,5 metrin syvyydessä Oulujoen pohjoiseen suuntautuvan virtauksen reunalla. Virtaus mahdollistaa jäteveden tehokkaan laimentumisen meriveteen. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

### 2.1.10 Lähtevän veden desinfiointi

Kesäkauden aikana käytössä on lähtevän veden desinfiointi Kemiran DesinFix-menetelmällä. Desinfiointiin käytetään muurahaishapon ja vetyperoksidin yhdistelmää eli permuurahaishappoa (PFA), jota valmistetaan jätevedenpuhdistamolla. Permuurahaishapon annostelun säätö tapahtuu automaatiojärjestelmästä virtaamaohjauksella. Desinfiointiliuosta syötetään lähtevään veteen purkuputken tarkastuskaivoon virtaaman perusteella. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

## 2.2 Lietteenkäsittely

Taskilan jätevedenpuhdistamolla on käytössä Kemira Operon Oy:n KemiCond-käsittely lietteen hygienisoimiseksi. Jätevedestä poistettava liete pumpataan esiselkeyttimistä KemiCond-käsittelyyn. Käytettävässä käsittelyssä ensimmäisenä lietteen pH lasketaan alle 4:n käsittelemällä sitä rikkihapolla. Tämän jälkeen liete desinfioidaan käyttäen vetyperoksidia, joka on vahva hapetin. Kemikaalikäsittelyllä tehtävällä lietteen desinfioinnilla hajuhaitat vähenevät ja lietteen rakenne muuttuu. Käsittelyn jälkeen lietteen pH nostetaan tasolle 5,5 – 6 käyttämällä natriumhydroksidia eli lipeää. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

KemiCond-käsittelyn jälkeen liete kuivataan lingoilla. Linkoja on käytössä kolme, joiden yhteiskapasiteetti on noin 80 m<sup>3</sup>/h. Kuivaustuloksen parantamiseksi ennen linkousta lietteen sekaan syötetään kationista muovipolymeeriä. Polymeerin avulla lietteeseen syntyy flokkeja ja vesi erottuu helpommin lietteestä. Linkokuivauksella lietteestä poistetaan vettä ja sen kuiva-ainepitoisuutta kasvatetaan. Ennen linkoa lietteen kuiva-ainepitoisuus on 3 – 5 % ja lingon jälkeen 22 – 25 %. Kuivauksen jälkeen liete välivarastoidaan silloihin (2 x 150 m<sup>3</sup>), joista se kuljetetaan jatkokäyttöön. Kuivauksessa lietteestä poistunut rejektivesi johdetaan tulopumppaamoon. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

Suurin osa lietteestä viedään Oulun lähiympäristöön pelloille ravinteeksi ja maanparannusaineeksi. Lisäksi lietettä kompostoidaan Haukiputaan Vasikkasuolle aumakompostointialueelle. Pieni osa lietteestä on viety myös biokaasulaitokselle mädätettäväksi. Lietteen kompostoinnin ja kuljetuksen hoitaa Kemira Operon Oy:n aliurakoitsija VRJ Pohjois-Suomi Oy. (Aluehallintovirasto 2017; Oulun Vesi 2012)

Vuonna 2017 kuivattua lietettä KemiCond-käsittelyssä syntyi yhteensä 31 657 tonnia. Käsiteltyä lietettä vietiin pelloille ravinteeksi ja maanparannusaineeksi yhteensä noin 18 120 tonnia. Aumakompostointialueelle Vasikkasuolle kuljetettiin lietettä kompostoitavaksi yhteensä noin 13 003 tonnia. Lisäksi biokaasulaitokseen lietettä vietiin 534 tonnia. (Oulun Vesi 2018)

### 3 TYPENPOISTO

Suomessa käsittelemättömän yhdyskuntajäteveden keskimääräinen typpipitoisuus on 35 – 40 mg/l, jossa typpeä esiintyy useissa eri muodoissa. Jäteveden kokonaistyyppi kuvaa jäteveden sisältämän typen kokonaismäärää kaikissa typen esiintymismuodoissa. Jätevedessä typpeä esiintyy sitoutuneena nitriittiin ( $\text{NO}_2^-$ ), nitraattiin ( $\text{NO}_3^-$ ) sekä ammoniumiin ( $\text{NH}_4^+$ ). Lisäksi jätevedessä on liuenneena inerttiä orgaanista typpeä, suspendoitunutta helposti hajoavaa orgaanista typpeä sekä suspendoitunutta inerttiä orgaanista typpeä. Pääasiassa jäteveden sisältämä orgaaninen tyyppi on peräisin virtsan sisältämästä ureasta ( $\text{H}_2\text{NCONH}_2$ ). Jätevesiin päätyy orgaanista typpeä myös ulosteiden ja muiden lähteiden proteiineista. (Gerardi 2006; Lehtniemi 2004; Säylä & Vilpas 2012)

Jätevedenpuhdistamoilla typenpoiston velvoitteet perustuvat Euroopan Unionin yhdyskuntajätevesidirektiiviin (91/271/ETY). Kyseisen direktiivin velvoitteet on otettu osaksi Suomen lainsäädäntöä, jonka pohjalta on luotu valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä (888/2006). Asetuksen mukaan jätevedenpuhdistamoiden ympäristölupahakemuksissa on selvitettävä typenpoiston tarve, joka edelleen ratkaistaan ympäristöluvassa. Jätevedenpuhdistamoiden ympäristöluvista on asetettu jokaiselle puhdistamolle omat typenpoiston vaatimukset yhdyskuntajätevesiasetuksen vaatimusten sekä Suomen Itämeren suojeluohjelman mukaisesti, koska puhdistetussa jätevedessä esiintyvä tyyppi on rehevöitymistä säätelevä ravinne. Jätevedenpuhdistamoiden purkuvesissä esiintyvä tyyppi, erityisesti ammoniumtyppi, kuluttaa merkittävästi purkualueen vesien happivarantoja sekä heikentää vesistöjen ekologista tilaa. Typenpoiston tehokkuus on parantunut viime vuosien aikana, mutta kokonaistypen vähentäminen on edelleen suurimpia haasteita jätevedenpuhdistamoilla. Typpi säätelee vesialueiden rehevöitymistä, joten typenpoiston vaatimukset monilla alueilla ovat kiristyneet tai ovat kiristymässä. (Säylä & Vilpas 2012)

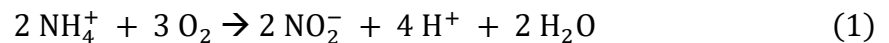
#### 3.1 Biologinen typenpoisto

Tyypillisesti biologinen typenpoisto tapahtuu aktiivilieteprosessissa hyödyntämällä jäteveden luontaista mikrobikantaa. Typenpoisto tapahtuu denitrifikaation ja nitrifikaation kautta, jotka ovat mikrobiologisia prosesseja. Kumpikaan prosesseista yksistään ei riitä typenpoistoon, vaan kokonaistypenpoistoon tarvitaan molemmat osaprosessit. (Rantanen et al. 1999) Nitrifikaatiossa ammoniumtyppi hapetetaan

nitraatiksi, ja denitrifikaatiossa nitraatti pelkistetään typpikaasuksi. Tällöin typpi poistuu jätevedestä typpikaasuna siirtäen sen ilmakehään vaarattomassa muodossa. (Grady et al. 2011)

### 3.1.1 Nitrifikaatio

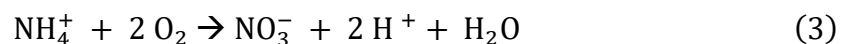
Nitrifikaatio on aerobinen biologinen prosessi, joka perustuu autotrofisten nitrifikaatiobakteerien toimintaan. Autotrofiset eli hiilidioksidia hiilen lähteenä käyttävät bakteerit hapettavat ammoniumtyyppiä nitriitiksi ja edelleen nitraatiksi. (Rantanen et al. 1999) Ensimmäisessä vaiheessa eli nitritaatiassa (yhtälö 1) ammoniumtyyppi (ammoniumioni,  $\text{NH}_4^+$ ) hapetetaan nitriitiksi (nitriitti-ioni,  $\text{NO}_2^-$ ). Tähän reaktioon osallistuvat muun muassa *Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosococcus*, *Nitrosovibrio* ja *Nitrosolobus* –bakteerit. (Lehtniemi 2004)



Nitrifikaation seuraavassa vaiheessa eli nitrataatiassa (yhtälö 2) nitriitti hapetetaan nitraatiksi (nitraatti-ioni,  $\text{NO}_3^-$ ). Nitrataatiassa toimivia bakteereja ovat esimerkiksi *Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrospira*, *Nitrocystis* ja *Nitrococcus* –bakteerit. (Lehtniemi 2004)



Tällöin nitrifikaatiossa tapahtuva kokonaisreaktio on yhtälön 3 mukainen.



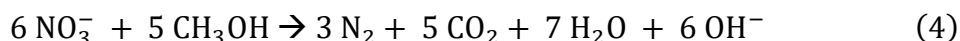
Kokonaisreaktioyhtälön mukaan nitrifikaation teoreettinen hapentarve on noin 4,6 grammaa ja 0,14 mol alkaliteettia jokaista hapettunutta ammoniumtyyppigrammaa kohden. Nitrifikaatiossa vapautuva energia hyödynnetään bakteerien kasvussa. Nitrifikaatiobakteerien kasvunopeus on hidas, mikä on jätevedenpuhdistamoilla yksi yleisimmistä ongelmista nitrifikaatioon liittyen. Tyypillisesti nitrifikaatiobakteerien vaatima viipymäaika on yli 15 vuorokautta. Lisäksi pitempi viipymäaika on tarpeen, jos prosessissa esiintyy toksisia aineita, liuenneen hapen pitoisuus on matala tai lämpötila on alhainen. (Lehtniemi 2004; Rantanen et al. 1999)

Nitrifikaatiobakteerit jaetaan yleisesti kahteen ryhmään: ammoniumtyypeä hajottavat bakteerit AOB (*ammonium oxidizing bacteria*) ja nitriittiä hajottavat bakteerit NOB (*nitrite oxidizing bacteria*). AOB-bakteerit osallistuvat ammoniumtypen hapettamiseen nitriitiksi ja vastaavasti NOB-bakteerit hapettavat nitriitin nitraatiksi. Teoreettinen AOB/NOB –suhde tulisi olla 2:1, jotta nitrifikaatioprosessi olisi tasapainossa. Tällöin prosessin välituotetta nitriittiä ei kerry systeemiin. Pienikin nitriittikonsentraatio voi olla myrkyllinen vesieliöille ja jäteveden organismeille. (Yao & Peng 2017)

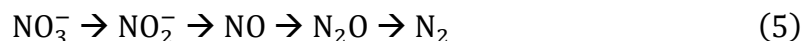
### 3.1.2 Denitrifikaatio

Kokonaistypenpoistossa biologinen denitrifikaatio on yleisin prosessityyppi. Denitrifikaatiossa heterotrofiset bakteerit käyttävät eloperäisiä yhdisteitä hiilen- ja energian lähteinä pelkistäessään nitriitin ja nitraatin typpikaasuksi ( $N_2$ ), hajottaen samalla orgaanista ainetta. Denitrifikaatio tapahtuu anoksisissa olosuhteissa, jossa liuennutta happea ei ole läsnä tai happipitoisuus on hyvin pieni. Denitrifikaatiobakteerit käyttävät soluhengitykseen nitriitin ja nitraatin happea, ja ovat siten anaerobisia. Denitrifikaatiobakteereja ovat esimerkiksi *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Lactobasillus* ja *Pseudomonas* –suvun lajit. (Gray 2010; Lehtniemi 2004; Rantanen et al. 1999)

Denitrifikaatioon tarvitaan orgaanista hiiltä. Hiililähteenä voidaan hyödyntää jäteveden sisältämää orgaanista ainetta, lietteen omaa ravintosisältöä tai prosessiin lisättävää hiililähdettä. (Lehtniemi 2004) Yhtälössä 4 esitetyssä denitrifikaation kokonaisreaktiossa hiililähteenä on käytetty metanolia.



Denitrifikaatiossa voi syntyä sivutuotteina typen oksideja (yhtälö 5), sillä nitraatin pelkistyminen typpikaasuksi tapahtuu välivaiheittain. (Rantanen et al. 1999) Sivutuotteiden syntyminen ei ole toivottavaa, sillä kaikki välituotteet ovat myrkyllisiä tai haitallisia: nitriitti ( $\text{NO}_2^-$ ) inhiboi mikro-organismien toimintaa prosessissa, typpimonoksidi ( $\text{NO}$ ) muuttuu ilmakehässä haitalliseksi typpidioksidiksi ( $\text{NO}_2$ ), ja dityppioksidi ( $\text{N}_2\text{O}$ ) puolestaan luokitellaan kasvihuonekaasuksi. (Lehtniemi 2004)

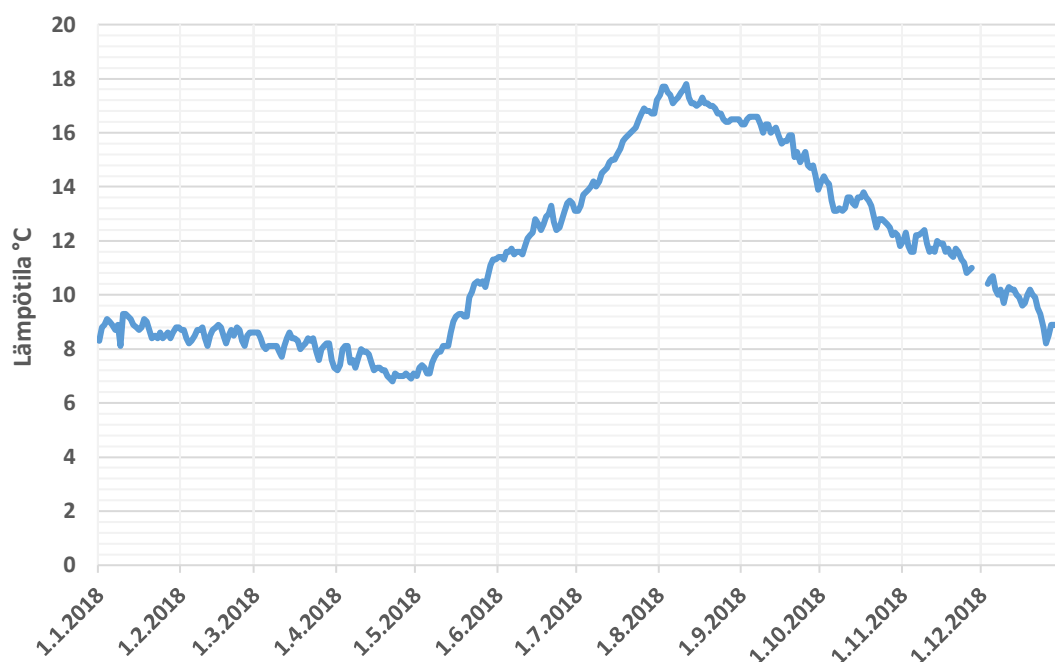


Denitrifikaatiossa veden alkaliteetti kasvaa 0,07 mol jokaista pelkistynyttä nitraattityppigrammaa kohden. Tällöin puolet nitrifikaation aikana menetetystä alkaliteetista saadaan takaisin, jos kaikki nitrifikaatiossa syntynyt nitraatti denitrifioituu. Denitrifikaatiobakteerit poistavat tehokkaasti orgaanista ainetta samanaikaisesti nitraatin kanssa, jopa 3 – 5 grammaa BOD<sub>7</sub>: aa kuluu pelkistynyttä nitraattityppigrammaa kohden. Denitrifikaatioreaktion nopeus riippuu käytettävästä hiililähteestä. Reaktionopeus on sitä suurempi, mitä pienimolekyylisempi hiililähde on käytössä. Lisäksi ulkoista hiililähdettä käytettäessä saavutetaan suurempi reaktionopeus kuin lietteen ja jäteveden omaa ravintosisältöä käytettäessä. Yleisimpiä käytössä olevia ulkoisia hiililähteitä ovat hydrolysoitu liete, metanoli, etanoli, hiilihydraatit ja elintarviketeollisuuden jätteet. Metanoli on hyvä vaihtoehto hiililähteeksi, koska se on pienimolekyylinen yhdiste ja sen annostelu prosessiin on helposti kontrolloitavissa. (Gray 2010; Lehtniemi 2004; Rantanen et al. 1999)

## **3.2 Typenpoistoon vaikuttavia tekijöitä**

### **3.2.1 Lämpötila**

Typenpoisto riippuu vahvasti lämpötilasta, joten Suomen kylmät sääolosuhteet sekä kevään kylmät sulamisvedet rajoittavat typenpoistoa tai mahdollisesti jopa pysäyttävät sen. Erityisesti typenpoiston nitrifikaatio on lämpötilariippuvainen, mikä tekee prosessista haasteellisen jäteveden lämpötilan ollessa matalalla. Tällöin ammoniumin hapettuminen nitrifikaatiossa on hitaampaa talvella ja kevään sulamisvesien aikaan kuin kesällä. (Lehtniemi 2004; Rantanen et al. 1999) Taskilassa typenpoiston velvoitteet ovatkin voimassa, kun prosessilämpötila on yli 12 °C (Aluehallintovirasto 2017). Kuvassa 2 on esitetty veden lämpötila Taskilan jätevedenpuhdistamolla vuonna 2018. Veden lämpötila on ollut yli 12 °C kesäkuulta lokakuulle, 12.6. – 10.11.2018, jolloin typenpoiston velvoitteet ovat olleet voimassa.



Kuva 2. Taskilan jätevedenpuhdistamon veden lämpötila vuonna 2018

Nitrifikaatiobakteerien kasvunopeus ja aktiivisuus ovat lämpötilariippuvaisia. Lämpötilan noustessa bakteerien kasvunopeus ja aktiivisuus ovat suurempia, jolloin nitrifikaatio tehostuu. Nitrifikaatiobakteereille optimilämpötila on 30 – 35 °C. Lämpötilan laskiessa 15 °C:seen nitrifikaation tehokkuus putoaa 50 %:iin. Lämpötilassa 10 °C nitrifikaation tehokkuus on enää 20 % optimaalisesta. Alle 5 °C:n ja yli 40 °C:n lämpötiloissa nitrifikaatio pysähtyy. Erityisesti nitrifikaation lämpötilariippuvuus tulee ottaa huomioon prosessimitoituksessa, jotta nitrifikaatiobakteerien hitautta voidaan kompensoida kasvattamalla bakteerien lukumäärää. Suomen kylmissä olosuhteissa nitrifikaatiota voidaan tehostaa nostamalla prosessin lieteikää sekä kiintoainepitoisuutta. Lisäksi nitrifikaatio on otettava huomioon ilmastustilavuudessa. Nitrifioivassa aktiivilieteprosessissa tarvitaan jopa nelinkertainen ilmastustilavuus verrattuna nitrifioimattomaan aktiivilieteprosessiin, kun lämpötila laskee 10 °C:seen. (Gerardi 2006; Rantanen et al. 1999)

Denitrifikaatio ei ole niin riippuvainen lämpötilasta kuin nitrifikaatio, koska denitrifikaatiobakteereihin luetaan suuri joukko lämpötilavaatimuksiltaan erilaisia bakteereja. Tällöin denitrifikaation optimilämpötila riippuu paikallisista olosuhteista ja aktiivilieteprosessissa esiintyvistä denitrifikaatiobakteereista. Denitrifikaatiota tapahtuu lämpötilan ollessa välillä 5 – 30 °C. Alle 5 °C lämpötiloissa denitrifikaatiota ei esiinny. Lämpötilan noustessa denitrifikaation nopeus kasvaa, koska korkeammissa lämpötiloissa

happi liukenee veteen huonommin, mikä edesauttaa denitrifikaation toteutumista. Kylmemmissäkin olosuhteissa typenpoisto onnistuu, mikäli nitrifikaatio saadaan tapahtumaan, ja denitrifikaatiolle luodaan suotuisat olosuhteet: liuennutta happea ei esiinny ja käytettävissä on riittävästi orgaanista ainesta. (Gerardi 2006; Lehtniemi 2004; Rantanen et al. 1999)

### **3.2.2 Happipitoisuus**

Nitrifikaatiobakteerit ovat aerobisia bakteereja ja vastaavasti denitrifikaatiobakteerit ovat anaerobisia, joten typenpoiston kannalta bakteereille täytyy luoda aerobiset sekä anaerobiset olosuhteet aktiivilieteprosessiin. Nitrifikaatiota tapahtuu vain, kun prosessissa on läsnä vapaata happea ( $O_2$ ) liukoisessa muodossa. Liuenneen hapen optimikonsentraatio nitrifikaatiolle on 2 – 3 mg/l. Alhaisemmilla liuenneen hapen pitoisuuksilla nitrifikaationopeus heikkenee ja loppuu, kun happipitoisuus on alle 0,5 mg/l. Kun liuenneen hapen konsentraatio on yli 3 mg/l, energiankulutukset kasvavat suhteessa nitrifikaatiosta saataviin hyötyihin. Lisäksi korkeat liuenneen hapen pitoisuudet haittaavat myös denitrifikaatiota, kun jätevesi kiertää aktiivilieteprosessissa. (Gerardi 2006; Lehtniemi 2004)

Liuennut happi inhiboi denitrifikaatiota, sillä denitrifikaatio vaatii anoksiset olosuhteet. Denitrifikaatiota tapahtuu, kun liuenneen hapen konsentraatio on mahdollisimman alhainen, mutta vähintään alle 1 mg/l. (Gerardi 2006)

### **3.2.3 pH ja alkaliteetti**

Nitrifikaatiobakteerit toimivat laajalla pH-alueella, 5 – 8,5. Kuitenkin nitrifikaatio hidastuu merkittävästi, jos pH on alle 6,7. Nitrifikaatiobakteerit lopettavat toimintansa pH:n laskiessa alle viiden. Tällöin nitrifikaatiota voi tapahtua vielä organotrofisten eli orgaanista hiiltä hajottavien bakteerien toimesta. Optimaalisin pH-alue nitrifikaatiolle on 7,3 – 8,5. Nitrifikaation aikana veden alkaliteetti kuluu, jolloin pH laskee. Alkaliteetin kuluminen hidastaa nitrifikaatiota, joten pH:ta voidaan nostaa lisäämällä prosessiin emäksistä ainetta, kuten kalkkia, kalsinoitua soodaa, natriumbikarbonaattia tai magnesiumhydroksidia. (Gerardi 2006; Lehtniemi 2004)

Denitrifikaatiobakteerien toiminta-alue pH:n suhteen on välillä 7 – 8, mutta optimaalisin alue on 7 – 7,5. pH:n laskiessa alle kuuden sekä noustessa yli kahdeksan,



denitrifikaationopeudet heikkenevät huomattavasti. Denitrifikaation aikana veden alkaliteetti kasvaa, sillä denitrifikaatioreaktiossa syntyvät  $\text{OH}^-$  -ionit nostavat veden pH:ta. Tämä osaltaan palauttaa nitrifikaatiossa kulunutta veden alkaliteettia luonnollisesti. Optimaalisella pH-alueella denitrifikaation aikana voidaan palauttaa jopa 50 % nitrifikaation aikana kuluneesta veden alkaliteetista, kun käytössä on denitrifikaatio-nitrifikaatio –prosessi. (Gerardi 2006; Gray 2010; Lehtniemi 2004)

### 3.2.4 Hiili-typpe –suhde

Tulevan jäteveden hiili-typpe –suhde eli C/N –suhde vaikuttaa nitrifioivaan sekä denitrifioivaan systeemiin. Nitrifikaatiossa tulevan jäteveden C/N –suhteen toivotaan olevan alhainen, kun taas denitrifikaatiossa C/N –suhteen tulisi olla korkea. Nitrifikaatiossa hiili-typpe –suhde kuvaa nitrifikaatiobakteerien osuutta aktiivisesta biomassasta. Jos C/N –suhde on korkea, nitrifikaatioon tarvittavaa pelkistettyä typpeä on saatavilla vähän tai ei lainkaan. Matala C/N –suhde taas kertoo, että pelkistettyä typpeä on käytössä paljon. Tällöin nitrifikaatiobakteerien osuus aktiivisesta biomassasta on suurempi, koska denitrifikaatiobakteerien olosuhteet muuttuvat epäsuotuisimmiksi hiilen osuuden ollessa pieni. (Lehtniemi 2004)

Denitrifikaatiossa tulevan jäteveden hiili-typpe –suhde vaikuttaa denitrifikaatioprosessin lopputuotteisiin. Optimiolosuhteissa C/N –suhteen ollessa korkea yli 95 % nitraatista ja nitriitistä muuttuu denitrifikaatiossa typpikaasuksi ( $\text{N}_2$ ). Vastaavasti jos C/N –suhde on optimiolosuhteita matalammalla, muita typpikaasun muotoja, kuten dityppioksidia ( $\text{N}_2\text{O}$ ) voi muodostua, jolloin denitrifikaatio ei tapahdu täydellisesti. Korkea hiilisisältö tulevassa jätevedessä olisikin siis suositeltavaa, jotta denitrifikaatiossa syntyisi typpikaasua eikä kasvihuonekaasuksi luokiteltavaa dityppioksidia. Kuitenkin liian suuri hiilisisältö tulevassa jätevedessä aiheuttaa hiilen määrän lisääntymisen puhdistetussa jätevedessä. Tämän vuoksi C/N –suhde täytyy pitää optimaalisella tasolla, jotta dityppioksidin sekä hiilen määrä puhdistetussa jätevedessä pysyvät alhaisina. (Lehtniemi 2004)

Optimaalinen C/N –suhde riippuu typenpoistoon valitusta prosessijärjestelyistä, sillä täydellinen typenpoisto vaatii suotuisat olosuhteet nitrifikaatiolle sekä denitrifikaatiolle. Nitrifikaation ja denitrifikaation yhdistelmäprosessissa C/N –suhde on tällöin yksi rajoittavista tekijöistä. Yleisimmässä prosessijärjestelyssä eli denitrifikaatio-nitrifikaatio –prosessissa optimaalinen tulevan jäteveden hiili-typpe –suhde on 5 – 10. Tällöin

denitrifikaatioon on saatavilla tarpeeksi orgaanista hiiltä ja edelleen, kun denitrifikaatiossa hiili on käytetty loppuun, saa nitrifikaatiobakteerit suotuisat olosuhteet nitrifikaatiolle. (Lehtniemi 2004; Rantanen et al. 1999)

## 4 KALVOSUODATUS

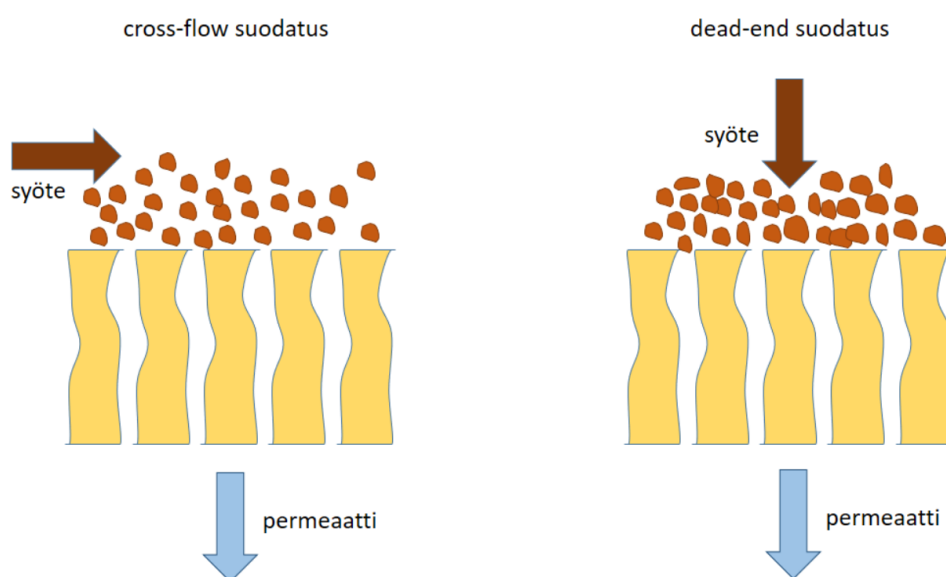
Kalvosuodatus on fysikaalinen erotusmenetelmä, jossa puoliläpäisevä kalvo toimii fysikaalisena esteenä erotettaville aineille ja partikkeleille. Erotettavia materiaaleja ei tarvitse käsitellä termisesti, kemiallisesti tai biologisesti ennen kalvosuodatusta, mikä on yksi kalvosuodatuksen eduista verrattuna muihin erotusmenetelmiin. Kalvosuodatus on ollut tunnettu erotusmenetelmä jo pitkän aikaa, mutta viimeisten vuosien aikana kalvosuodatustekniikka on siirtynyt laboratorioista isompaan mittakaavaan ja tekniikkaa on otettu käyttöön perinteisten vedenpuhdistusmenetelmien rinnalle teollisuudessa sekä veden- ja jätevedenpuhdistamoilla. (Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)

Kalvotekniikkaa käytetään laajalti suolan poistoon, juomaveden tuotantoon, teollisuusvesien käsittelyyn, sekä veden puhdistukseen ja uusiokäyttöön. Kalvotekniikan ja uusimpien kalvomodulien kehitys on viime vuosina kiihdyttänyt kalvotekniikan kasvua ja kalvotekniikan käyttöönottoa muun muassa juomaveden ja jäteveden puhdistuksessa. Vedenpuhdistuksessa kalvoerotusprosessit ovat yleistymässä perinteisten menetelmien rinnalla yhdistelmäprosesseina, mutta myös pienemmässä mittakaavassa yksinään. Vedenpuhdistuksen lisäksi kalvosuodatusta käytetään ruoan ja farmaseuttisten tuotteiden valmistuksessa, kemikaalien tuotannossa, energian muuntolaitteissa kuten polttokennoissa, sekä lääketieteen laitteissa. (Singh 2015)

Kalvosuodatuksessa kalvo tai membraani on puoliläpäisevä este kahden homogeenisen faasin välillä. Puoliläpäisevänä esteenä kalvo päästää selektiivisesti osan partikkeleista läpi ja suodattaa osan. Lisäksi kalvo sallii joidenkin partikkeleiden kulkea kalvon läpi nopeammin kuin muiden. Yleisesti kalvosuodatuksessa kalvoille tulevasta syötteestä kalvon läpi päässyttä osuutta kutsutaan permeaatiksi, ja kalvon ulkopuolelle jäänyttä osuutta syötteestä kutsutaan konsentraatiksi tai retentaatiksi. Kalvosuodatuksessa ajavana voimana kalvon läpi toimii paine-ero kalvon syöte- ja permeaattipuolen välillä. Riippuen kalvotekniikasta, paine voi olla ylipaine syötepuolella tai alipaine permeaattipuolella. Ajavana voimana voi olla myös konsentraatioero tai potentiaaliero eri puolilla kalvoa. Vedenpuhdistukseen tarkoitetuissa sovelluksissa ajavana voimana toimii yleensä kalvopaine-ero. (Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)

Kalvosuodatuksessa on käytössä kaksi toimintatapaa: cross-flow ja dead-end suodatus. Toimintatavat ovat esitettyinä kuvassa 3. Cross-flow suodatuksessa syöte pumpataan

kalvon pinnan suuntaisesti ja permeaatti imetään suoraan kalvon läpi. Dead-end suodatuksessa syöte pumpataan kohtisuoraan kalvoa kohti. Molemmilla suodatustavoilla on omat etunsa ja haittansa. Cross-flow suodatuksessa kalvon pinnan likaantuminen on vähäisempää kuin dead-end suodatuksessa, sillä syöte virtaa jatkuvasti kalvon pinnalla. Dead-end suodatuksessa kalvon pinnalle muodostuu helpommin vastustava likakerros. Cross-flow suodatus vaatii enemmän energiaa kuin dead-end suodatus, jotta aikaan saadaan tarvittava jatkuva syötteen virtaus. (Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)



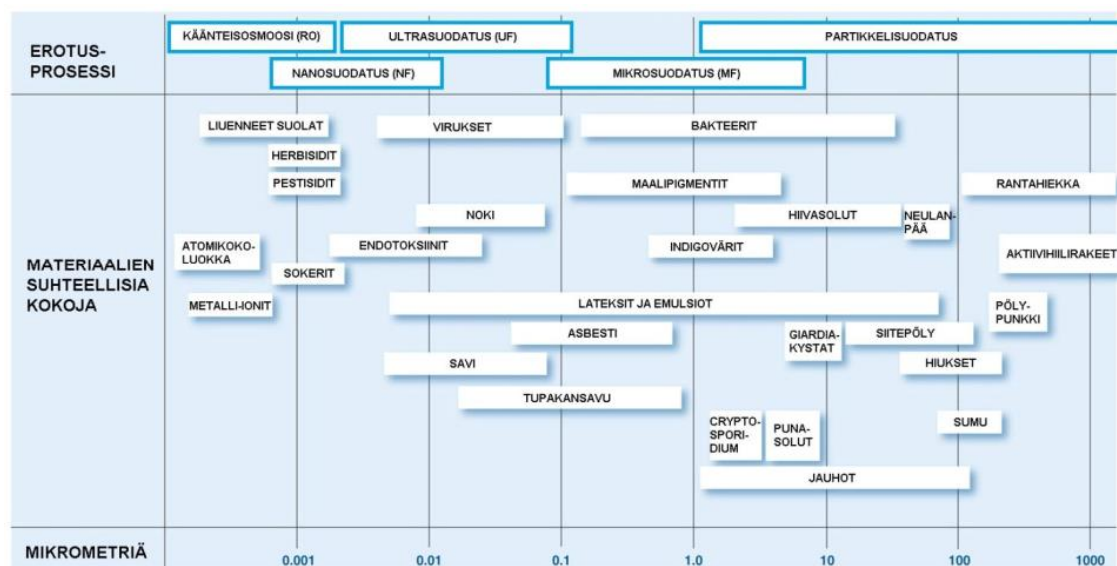
Kuva 3. Cross-flow ja dead-end suodatustavat (mukaillen Pinnekamp & Friedrich 2003)

#### 4.1 Kalvosuodatus vedenpuhdistuksessa

Jätevedenpuhdistuksessa käytettävät kalvosuodatusmenetelmät eroavat toisistaan kalvojen suodatuskyvyn perusteella, mihin vaikuttavat kalvojen huokoskoko sekä käytettävä ajava voima. Käytettävä kalvosuodatusmenetelmä valitaan jäteveden koostumuksen sekä puhdistustavoitteiden perusteella. Teollisuuden jätevesiä on mahdollista käsitellä kalvosuodatuksella, etenkin jos suodatusprosessi voidaan helposti integroida tuotantoprosessiin. Tällöin jäteveden käsittelyn lisäksi on mahdollista hyödyntää puhdistettua jätevettä tuotantoprosessissa uudelleen, jos permeaatti kierrätetään takaisin prosessiin. Kunnallisella jätevedenpuhdistamolla puhdistustavoitteena on erityisesti erottaa biomassa jätevedestä, jotta puhdistettu jätevesi täyttää lähtevän veden standardit ja jätevedenpuhdistamolle asetetut lupaehdot. (Pinnekamp & Friedrich 2003)

Kalvosuodatusmenetelmät jaotellaan kalvojen huokoskoon perusteella neljään luokkaan suuremmasta pienempään: mikrosuodatus (*microfiltration*, MF), ultrasuodatus (*ultrafiltration*, UF), nanosuodatus (*nanofiltration*, NF) ja käänteisosmoosi (*reverse osmosis*, RO). Mikrosuodatus ja ultrasuodatus ovat sopivia menetelmiä kunnalliselle jätevedenpuhdistukselle, jolloin jätevedestä saadaan erotettua muun muassa kiintoainetta ja bakteerit. Nanosuodatus ja käänteisosmoosi sopivat käytettäviksi hankalimmille jätevesille teollisuudessa sekä pienen huokoskoon ansiosta puhtaan veden tuotantoon. Lisäksi kalvosuodatusmenetelmiä voidaan yhdistää käyttämällä eri menetelmiä peräkkäin, jolloin voidaan esimerkiksi mikro- tai ultrasuodatuksen jälkeen veden puhtautta lisätä käänteisosmoosilla tai nanosuodatuksella. (Judd & Jefferson 2003; Pinnekamp & Friedrich 2003)

Kuvassa 4 on esitetty eri kalvosuodatusmenetelmien huokoskoot suhteutettuna vedestä erotettavien partikkeleiden kokoon. Kalvosuodatuksessa kalvon huokoskokoa suuremmat aineet jäävät kalvojen ulkopuolelle, jolloin ne voidaan erottaa puhdistetusta vedestä. Huokoskokoa pienemmät partikkelit pääsevät kalvon läpi puhdistettuun veteen, permeaattiin. Esitetyissä kalvosuodatusmenetelmissä ajavana voimana käytetään kalvopaine-eroa, joka kasvaa kuvassa mentäessä oikealta vasemmalle (Judd & Jefferson 2003). Tällöin tarvitaan suurempi kalvopaine-ero, mitä pienempi kalvon huokoskoko on.



Kuva 4. Veden suodatusspektri ja kalvosuodatusmenetelmien suodatuskyky (Lignell et al. 2015)

#### 4.1.1 Mikro-suodatus

Mikro-suodatuksessa kalvon huokoskoko on 0,05 – 10 µm, jolloin kaikki vähintään yli 10 µm kokoiset partikkelit voidaan suodattaa. Kalvojen pinnalle kertyy vähitellen partikkeleita, jolloin kalvot likaantuvat. Partikkelit kerääntyvät huokosten reunoille pienentäen huokosia. Tällöin suodattua voi myös huokoskokoja pienemmät partikkelit. Mikro-suodatuksella voidaan vedestä suodattaa mikrobisolut, isot kolloidit ja suurimmat partikkelit. Lisäksi bakteerit voidaan suodattaa, riippuen valitusta huokoskoosta. Kuitenkaan viruksiin mikro-suodatus ei tehoa, ellei virukset ole liittyneenä suurempiin partikkeleihin. (Gray 2010; Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)

Mikro-suodatukseseen tarvittava kalvopaine-ero on tyypillisesti 0,1 – 3 bar, jolla permeaatti saadaan virtaamaan kalvon läpi sen toiselle puolelle. Käytössä voi olla cross-flow tai dead-end suodatustapa, riippuen käyttökohteesta. Mikro-suodatuksen kalvo on tavallisesti valmistettu ohuesta polymeerifilmistä, jossa huokokset ovat tasalaatuisia ja tiheästi kalvossa. Korkea huokosten tiheys mahdollistaa pienen hydrodynaamisen vastuksen ja siten mikro-suodatuksessa voidaan käyttää korkeaa syötteen virtausta. (Gray 2010; Pinnekamp & Friedrich 2003)

#### 4.1.2 Ultra-suodatus

Ultra-suodatus on vastaavanlainen menetelmä kuin mikro-suodatus, mutta käytössä on kalvo, jonka huokoskoko on pienempi, tyypillisesti 0,001 – 0,05 µm. Ultra-suodatukseseen vaadittava kalvopaine-ero on 0,5 – 3 bar, mikä on suurempi kuin mikro-suodatuksessa. Ultra-suodatuksella vedestä voidaan suodattaa makromolekyylit ja orgaaniset yhdisteet, joilla on suuri molekyylimassa, kuten proteiinit, entsyymit, kolloidit, hormonit ja öljyt. Lisäksi ultra-suodatus tehoaa bakteereihin ja suurikokoisimpiin viruksiin. Käytännössä ultra-suodatuksella saavutetaan kiintoainevapaata permeaattia, mutta liukoisiin aineisiin se ei tehoa. (Gray 2010; Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)

Ultra-suodatuksessa käytettävä kalvo on rakenteeltaan asymmetrinen polymeerikalvo tai epäorgaaninen keraaminen kalvo. Kalvot ovat todella ohuita, tyypillisesti alle 1 µm, joten kalvoilla täytyy olla paksumpi ja huomattavasti huokoisempi tukimateriaali. Kalvon pieni huokoskoko sekä mikro-suodatusta matalampi huokostiheys aiheuttavat suuren hydrodynaamisen vastuksen, joten syötteen ja siten myös permeaatin virtaama on alhaisempi. Käytössä voi olla cross-flow tai dead-end suodatustapa. Ultra-suodatus on

kehitetty alun perin jätevedenpuhdistukseen poistamaan kiintoainetta sekä makromolekyylejä. Nykyään ultrasuodatusta käytetään myös puhtaan veden tuotannossa osana esikäsittelyä, ruoan tuotannossa, biotekniikan alalla sekä kemikaalien tuotannossa. (Gray 2010; Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)

#### 4.1.3 Nanosuodatus

Nanosuodatuksessa käytössä olevassa kalvossa huokoskoko on  $0,0005 - 0,01 \mu\text{m}$ , keskimäärin  $0,002 \mu\text{m}$  (2 nm). Nanosuodatukseseen tarvittava kalvopaine-ero on huomattavasti suurempi kuin mikro- ja ultrasuodatuksessa, tyypillisesti 2 – 40 bar. Nanosuodatuksen erotuskyky riippuu kalvon huokoskoosta sekä sen ioniselektiivisyydestä eli varauksesta (neutraali, positiivisesti varautunut tai negatiivisesti varautunut). Neutraaleilla nanosuodatuskalvoilla voidaan erottaa veteen liuenneita aineita molekyylin koon perusteella. Positiivisesti varautuneet nanosuodatuskalvot hylkivät positiivisesti varautuneita kationeja, erityisesti kaksivalenssisia kationeja, kuten  $\text{Ca}^{2+}$  sekä vetävät puoleensa negatiivisesti varautuneita anioneja, erityisesti  $\text{SO}_4^{2-}$ . Vastaavasti negatiivisesti varautuneet nanosuodatuskalvot hylkivät anioneja, kuten  $\text{SO}_4^{2-}$  sekä vetävät puoleensa kationeja, erityisesti  $\text{Ca}^{2+}$ . (Gray 2010; Singh 2015)

Nanosuodatus toimii pääsääntöisesti cross-flow suodatustavalla, ja kalvot ovat yleensä valmistettu asymmetrisestä polymeeristä. Nanosuodatusta voidaan hyödyntää, kun vedestä halutaan poistaa suoloja, liuenneita aineita, väriä, pieniä orgaanisia ja karsinogeenisiä molekyylejä sekä metalleja. Yksi yleisimmistä nanosuodatuksen sovelluskohteista on veden pehmentäminen. Nanosuodatuksella voidaan poistaa kaksivalenssisia ioneja vedestä, kuten  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  ja  $\text{Cr}^{2+}$ , mutta monovalenssisia ioneja nanosuodatuksella ei voi erottaa, vaan esimerkiksi  $\text{Cl}^-$  ja  $\text{Na}^+$  -ionit menevät kalvon läpi permeaattiin. (Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)

#### 4.1.4 Käänteisosmoosi

Käänteisosmoosissa käytetään puoliläpäisevää kalvoa, jonka huokoskoko on äärimmäisen pieni, joten voidaan jopa sanoa, että käänteisosmoosin kalvoissa ei ole huokosia. Käänteisosmoosilla vedestä voidaan poistaa suoloja ja metalli-ioneja diffuusion avulla. Osmoosi on ilmiö, jossa vesimolekyylit pyrkivät siirtymään laimeammasta liuoksesta väkevämpään liuokseen tasoittaakseen väkevyyseroja. Kun puoliläpäisevää kalvoa käytetään erottamaan väkevä ja laimea liuos toisistaan

(esimerkiksi merivesi ja puhdas vesi), vesi liikkuu kalvon läpi laimean liuoksen puolelta väkevämpään liuokseen niin kauan, kunnes konsentraatio on sama kalvon molemmilla puolilla. Toisaalta veden liike kalvon läpi aiheutuu paine-erosta ja vesi liikkuu kalvon läpi, kunnes paine on sama molemmissa liuoksissa. Tätä osmoosin aiheuttavaa paine-eroa kutsutaan osmoottiseksi paineeksi. (Gray 2010; Singh 2015)

Käänteisosmoosissa hyödynnetään osmoosin periaatetta, mutta vesi pyritään saamaan liikkumaan kalvon läpi väkevämmästä liuoksesta laimeaan liuokseen. Tällöin kalvon toisella puolella, väkevämmässä liuoksessa on suoloja ja veteen liuenneita aineita, ja laimeamman liuoksen puolella on puhdasta vettä. Käänteisosmoosi tapahtuu, kun väkevämmän liuoksen puolelle tuodaan osmoottista painetta suurempi paine, jolloin vesi saadaan virtaamaan kalvon läpi laimeampaan liuokseen. Käytettävä kalvopaine-ero käänteisosmoosissa on 5 – 70 bar ja erikoistapauksissa se voi olla jopa 120 bar. Vain vesi voi liikkua kalvon läpi, joten vedessä olleet suolat jäävät väkevän liuoksen puolelle. Käänteisosmoosiin perustuvaa suodatusta voidaan käyttää puhtaan veden tuotantoon sekä teollisuuden jätevesien puhdistukseen, kun jätevedet sisältävät hankalasti poistettavia haitallisia aineita. (Gray 2010; Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)



## 5 MBR – KALVOBIOREAKTORI

Termi MBR tulee englannin kielen sanoista *membrane bioreactor*, suomeksi kalvobioreaktori. MBR-prosessi on kalvosuodatuksen sovellus, jossa yhdistetään biologinen veden tai jäteveden puhdistusprosessi kalvosuodatukseseen. MBR-tekniikalla voidaan jätevedestä poistaa tehokkaasti BOD:a, COD:a, kiintoaineita, typen yhdisteitä ja kokonaistyyppiä sekä kokonaisfosforia. (Judd 2011) Tässä työssä keskitytään erityisesti MBR-prosessiin jätevedenpuhdistuksessa. Puhdistusmenetelmänä jätevedelle, MBR yhdistää biologiseen aktiivilieteprosessiin perustuvan orgaanisen aineen poiston sekä kalvosuodatukseseen perustuvan mekaanisen lietteen erottamisen.

MBR-prosessit vedenpuhdistuksessa ovat alkaneet yleistyä viime vuosina erityisesti Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. 1900-luvun alussa MBR-tekniikkaa ei ollut vielä käytössä, mutta kalvosuodatusmekaniikoita ja niiden mahdollisuuksia tutkittiin paljon. Ensimmäiset kaupalliset kalvobioreaktorit kehitettiin 1960-luvun lopulla, jolloin laivan jätevedet käsiteltiin perinteisen aktiivilieteprosessin ja ultrasuodatuksen avulla. 1990-luvun loppupuolella käynnistettiin ensimmäiset kunnalliseen jätevedenpuhdistukseen tarkoitetut MBR-laitokset Japanissa ja USA:ssa. 2000-luvulla Keski-Euroopassa on käynnistetty useita MBR-laitoksia veden- ja jätevedenpuhdistukselle. MBR-tekniikan kehitys on jatkunut vielä näihin päiviin saakka, mikä on tuonut markkinoille kymmeniä laitetoimittajia sekä MBR-tekniikan ratkaisuja teollisuuteen ja kunnalliselle puolelle. (Judd 2011) Viime vuosikymmenien aikana MBR on noussut globaaliksi ilmiöksi jätevedenpuhdistuksessa, ja MBR-tekniikkaa käyttävien jätevedenpuhdistamoiden lukumäärä ja koko ovat kasvaneet eksponentiaalisesti. Arvio vuodelle 2018 on, että kaikista maailman jätevesistä 3 – 4 % tultaisiin puhdistamaan MBR-tekniikan avulla. (Judd & Judd Ltd 2018a; Judd & Judd Ltd 2018c)

Suomessa ja muissa Pohjoismaissa MBR-tekniikka ei ole vielä laajalti käytössä. Kiinnostus MBR-tekniikka kohtaan on kasvussa, sillä maailmalla todetut hyvät puhdistustulokset MBR-laitoksilla ovat herättäneet mielenkiintoa. Suomessa haastavat ilmasto-olosuhteet, jätevedenkäsittelyn erityispiirteet, tiukat lupaehdot sekä kevään kylmät sulamisvedet luovat omat haasteensa MBR-tekniikan käytölle. Siten Keski-Euroopassa tai Pohjois-Amerikassa käytettävät MBR-tekniikan suunnittelu- ja ajotapakäytännöt eivät toimi suoraan Suomen jätevedenpuhdistamoille. (Lignell et al. 2015) MBR-tekniikan käyttöönotolle on tehtävä omanlaiset ratkaisut Suomen

olosuhteisiin ja vaatimuksiin. Kesän 2018 aikana Suomessa MBR-tekniikkaa otettiin käyttöön yhteensä kolmella jätevedenpuhdistamolla: Oulussa Taskilan jätevedenpuhdistamolla sekä Viitasaarella ja Parikkalassa.

## **5.1 MBR-tekniikka**

MBR-tekniikka voidaan toteuttaa monella eri tavalla, ja muun muassa kalvojen materiaali ja geometria vaikuttavat tekniikan toimintatapaan sekä puhdistustuloksiin. Lisäksi MBR-prosessiin vaikuttavat yksittäisten kalvojen sekä kalvomodulien sijoittelu ja asento veden virtaukseen nähden. MBR-prosesseissa yleisimmät kalvomateriaalit ovat valmistettu polymeeristä tai keraamista. Kalvobioreaktoreissa käytettävät kalvot voidaan jakaa kolmeen ryhmään kalvojen geometrian perusteella: tasomaiset kalvot, onttokuitukalvot ja putkimaiset kalvot. Lisäksi kalvoille on kaksi tapaa, miten ne voidaan sijoittaa aktiivilieteprosessiin nähden: suoraan lietteeseen tai kalvosuodatusprosessi voi olla erillisenä yksikkönä aktiivilieteprosessin jälkeen. (Judd 2011)

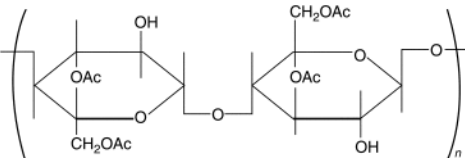
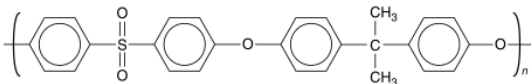
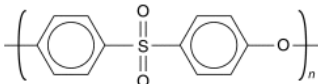
### **5.1.1 MBR-kalvomateriaalit**

Jätevedenpuhdistuksessa käytettävän kalvomateriaalin valintaan vaikuttavat jäteveden laatu ja ominaisuudet sekä jätevedenpuhdistamon toiminnan vaatimukset yhdessä valitun MBR-tekniikan ja kalvotyypin kanssa. MBR-tekniikassa on yleisesti käytössä orgaanisia polymeerivalmisteisia kalvoja sekä epäorgaanisia keraamisia kalvoja. Näissä kalvomateriaaleissa yhdistyy suuri suodatuskyky, erotettavien aineiden selektiivisyys sekä materiaalin kestävyys. Erityisesti veden ja jäteveden suodatuksessa kalvomateriaalilla tulisi olla sekä hydrofiilisiä että hydrofobisia ominaisuuksia. Näiden lisäksi kalvomateriaalin tulee sietää kulutusta, lämpötilan vaihteluita ja kemikaaleja. (Judd 2011; Singh 2015)

Polymeerivalmisteiset kalvot tarjoavat hyvät ominaisuudet epäpuhtauksien erotukselle, ja niitä voidaan muokata edelleen kalvon selektiivisyyden parantamiseksi. Kalvomateriaalina suositaan polymeeriä, joka on kemiallisesti ja termisesti stabiili, ja jolla on korkea lasittumislämpötila, sulamispiste ja kiteisyys. Kalvon pinnan morfologia ja ominaisuudet, kuten karheus, varaus ja hydrofiilisyys, vaikuttavat merkittävästi kalvon suorituskykyyn ja likaantumiseen. Kalvomateriaalin tärkeimpiä fysikaalisia ominaisuuksia ovat sen rajapintaominaisuudet, kuten rajapintajännitys ja adsorptio, koska kalvosuodatuksessa kiinteä kalvo on kosketuksissa nestefaasin kanssa. Fysikaaliset

ominaisuudet viittaavat materiaalin fyysisen rakenteen muutokseen tietyssä ympäristössä, kuten polymeerikalvon turpoamiseen orgaanisessa liottimessa tai kiteisyyden muutokseen korkeissa tai matalissa lämpötiloissa. Erityisesti mikro- ja ultrasuodatukseen käytettävien polymeerikalvojen suorituskyvylle rajapintaominaisuudet ovat erittäin tärkeitä van der Waalin vuorovaikutuksen, vetysidosten muodostumisen, sähköstaattisen vaikutuksen, varauksen siirron ja dipolimomentin vuoksi. (Singh 2015) Taulukossa 3 on esitettynä yleisimmät polymeerit kalvojen valmistuksessa sekä niiden rakennekaavat ja hydrofiilisyydet.

Taulukko 3. Yleisimmin käytettävät polymeerit kalvosuodatuksessa (muokattu Singh 2015)

Polymeeri	Rakenne	Ominaisuus
selluloosa-asetaatti (CA)		täysin hydrofiilinen
polypropyleeni (PP)	$\left( \text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3) \right)_n$	täysin hydrofobinen
polyetyleni (PE)	$\left( \text{CH}_2 \right)_n$	täysin hydrofobinen
polysulfoni (PS)		muokattavissa hydrofobinen/hydrofiilinen
polyeetterisulfoni (PES)		muokattavissa hydrofobinen/hydrofiilinen
polyakryylnitriili (PAN)	$\left( \text{CH}_2\text{CH}(\text{CN}) \right)_n$	muokattavissa hydrofobinen/hydrofiilinen
polyvinyylideenifluoridi (PVDF)	$\left( \text{CH}_2\text{CF}_2 \right)_n$	muokattavissa hydrofobinen/hydrofiilinen

MBR-tekniikassa ja erityisesti mikro- ja ultrasuodatuksessa käytössä olevat kalvon voivat olla täysin hydrofiilisiä polymeerejä, täysin hydrofobisia polymeerejä tai näiden väliltä, jolloin kalvoilla on molempia ominaisuuksia. Taulukossa 3 esitetyistä polymeereistä selluloosa-asetatti (CA) on täysin hydrofiilinen polymeeri. Polypropyleeni (PP) ja polyetyleni (PE) ovat täysin hydrofobisia polymeerejä. Näiden kahden ääripään välissä ominaisuuksiltaan ovat polysulfoni (PS), polyeetterisulfoni (PES), polyakryylnitriili (PAN) ja polyvinyyliideenifluoridi (PVDF). Käytännössä PS, PES, PAN ja PVDF ovat hydrofobisia polymeerejä, mutta niistä valmistettuja kalvoja voidaan muokata jossain määrin jälkikäsittelyllä tai käyttämällä lisäaineita, kuten toisia polymeerejä. Tällöin kalvoille saadaan niille toivottuja ominaisuuksia. (Judd 2011)

Viime vuosina keraamiset kalvomateriaalit ovat tulleet vaihtoehdoksi polymeerien rinnalle mikro- ja ultrasuodatukseseen. Keraamiset mikro- ja ultrasuodatuskalvot ovat mikrohuokoisia seuloja, joissa erottaminen tapahtuu hiukkasen koon ja nopeuden perusteella huokosen mutkittelevan muodon kautta. Kapillaari-ilmiö, adsorptio ja pintavaraus vaikuttavat kalvon suodatuksen ja erotuskykyyn. Yleisimmät keraamiset kalvomateriaalit ovat alumiinioksidin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) stabiilit  $\gamma$ - ja  $\alpha$ -muodot. Keraamiset kalvon tulevat kysymykseen erityisesti silloin, kun tuleva jätevesi on vaikeasti käsiteltävää sisältönsä ja koostumuksensa takia (esimerkiksi teollisuuden jätevedet), koska verrattuna polymeerikalvoihin keraamiset kalvot kestävät paremmin lämpöä ja kemikaaleja. Kuitenkin keraamiset kalvot ovat polymeerikalvoja paljon kalliimpia ja rakenteeltaan hauraampia. (Pinnekamp & Friedrich 2003; Singh 2015)

MBR-tekniikassa käytetyt kalvot yleensä käsittävät ohuen pintakerroksen (polymeeri tai keraaminen) paksumman huokoisemman kerroksen päällä, joka toimii tukirakenteena ja antaa kalvolle mekaanista lujuutta. Tyypillisesti kalvo on siten rakenteeltaan anisotrooppinen, joka on symmetrinen vain kohtisuorasti kalvoa vastaan olevassa suunnassa. Kalvot valmistetaan yleensä niin, että ne ovat mekaanisesti vahvoja ja niillä on suuri pinnan huokoisuus ja kapea huokoskokojakauma, jotta voidaan varmistaa mahdollisimman suuri läpäisykyky ja selektiivisyys. Lisäksi kalvomateriaaleilla tulee olla vastustuskykyä kemikaaleille, lämpötilan ja pH:n vaihteluille sekä likaantumiselle. (Judd 2011)

### 5.1.2 MBR-kalvotyypit

MBR-tekniikassa yleisimmin käytettävät kalvot voidaan jakaa geometriansa perusteella kolmeen luokkaan:

- a) tasomaiset kalvot (*flat sheet*, FS)
- b) onttokuitukalvot (*hollow fiber*, HF)
- c) putkimaiset kalvot (*multitubular*, MT)

Jokaisella kalvotyypillä on omat etunsa ja soveltuvuutensa tietyille sovelluksille, joten kalvotyypin valinta on tärkeä, kun harkitaan MBR-tekniikan hyödyntämistä. Tasomaisia kalvoja sekä onttokuitukalvoja käytetään paljon kunnallisen jäteveden puhdistukseen, mutta myös teollisuudessa. Putkimaisia kalvoja käytetään teollisuuden pienten jätevesivirtojen puhdistukseen tarkoitetuissa sovelluksissa. (Judd 2011; Judd & Judd Ltd 2018b)

Tasomaiset kalvot (kuva 5 a) ovat pääasiassa neliskulmaisia paneelimaaisia kalvoja, rakenteeltaan taipumattomia tai taipuisia. Tasomaiset kalvot asetellaan lähelle toisiaan, vain parin millimetrin välein. Useat vierekkäiset kalvot muodostavat modulin, jonka ympärillä on 4 – 6 millimetriä paksu muovikerros. Vierekkäiset modulit muodostavat kasetin, joka antaa kalvomoduleille tukirakenteen. Jätevesi ohjataan modulien muovikerrosten sisään ja vesi virtaa kalvojen ulkopuolelta niiden läpi. Permeaatti kerätään joko moduleiden keskikohtaan tai ylä- ja alaosaan kiinnitettyjen putkistojen kautta yhteiseen permeaattilinjaan. (Judd 2011, Judd & Judd Ltd 2018d)

Onttokuitukalvot (kuva 5 b) ovat ohuita putkimaisia kalvoja, joissa vesi virtaa onttokuidun ulkopuolelta kalvon läpi kuidun sisäpuolelle alipaineen avulla. Kuidut ovat upotettuina jäteveeseen, jolloin vesi suodattuu kalvon läpi ja permeaatti kulkee kuidun sisällä. Tuhannet kuidut muodostavat modulin, jossa kuidut on kiinnitetty molemmista päistään modulin jakotukkeihin, joista permeaatti johdetaan permeaattilinjastoon. Modulit pakataan vierekkäin ja/tai peräkkäin edelleen isommaksi yksiköksi, kasetiksi, joka lasketaan jäteveeseen. (Judd 2011, Judd & Judd Ltd 2018e)

Putkimaiset kalvot (kuva 5 c) muodostavat suurempia yksiköitä, kun halkaisijaltaan pienemmät putkimaiset kalvot asetetaan halkaisijaltaan suuremman paineputken sisään. Puhdistettava jätevesi syötetään putkimaisten kalvojen sisäpuolelle, jolloin vesi suodattuu

kalvon sisäpuolelta sen ulkopuolelle. Putkimaisten kalvojen ulkopuolelle syntyvä permeaatti kerätään edelleen paineputkesta permeaattilinjoihin. (Pinnekamp & Friedrich 2003; Judd & Judd Ltd 2018f)



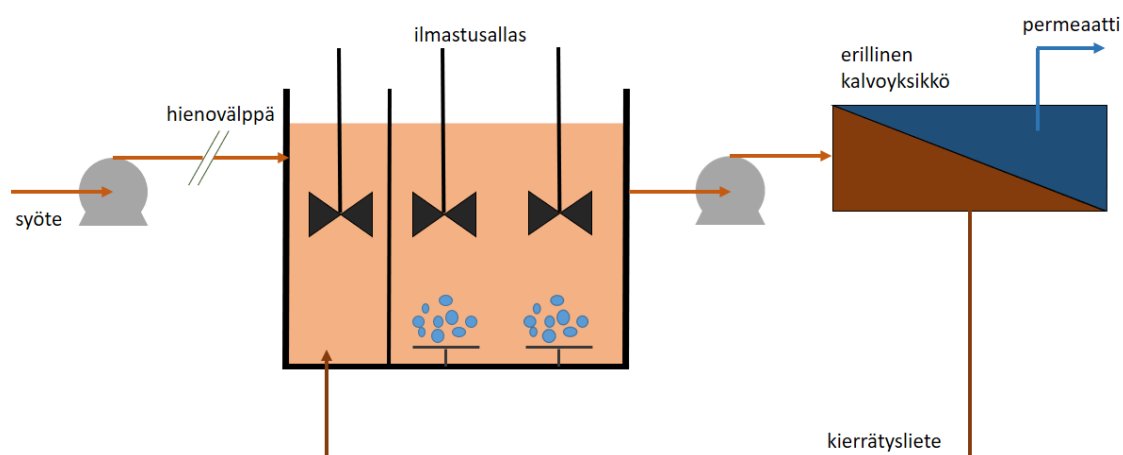
Kuva 5. MBR-tekniikassa käytettävät kalvotyypit: a) tasomaiset kalvot, b) onttokuitukalvot ja c) putkimaiset kalvot (Krzeminski 2013)

### 5.1.3 Kalvojen sijoittelu

MBR-prosessit voidaan jakaa kahteen ryhmään sen perusteella, miten kalvosuodatusyksikkö on integroitu aktiivilieteprosessiin nähden (Judd 2011):

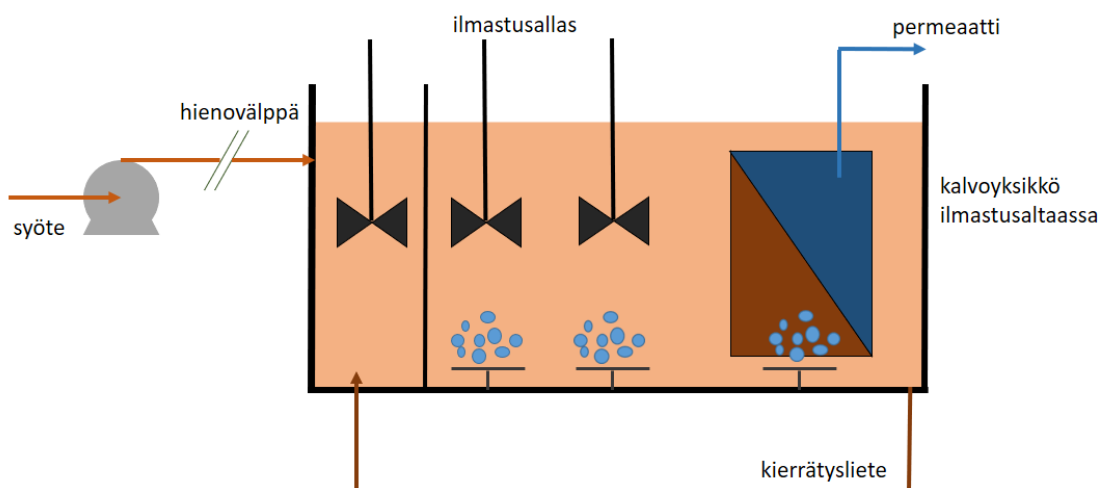
1. lietteeseen upotettavat kalvoyksiköt (*submerged/immersed* MBR, iMBR)
2. erilliset kalvoyksiköt aktiivilieteprosessin jälkeen (*sidestream* MBR, sMBR)

Aktiivilieteprosessista erilleen sijoitetut kalvovyksiköt (kuva 6) perustuvat cross-flow –suodatustapaan. Tällaisessa järjestelyssä aktiivilietettä kierrätetään prosessissa erilleen sijoitettujen kalvojen läpi. Putkimaiset kalvot ovat yleisesti käytettyjä erillisissä kalvovyksiköissä. Tälle järjestelylle on ominaista korkea veden virtaus, mikä vähentää kalvojen likaantumista. Korkea veden virtaus takaa hyvän suorituskyvyn, mutta nostaa suodatuksen vaadittavaa kalvopaine-eroa ja siten myös energiankulutusta. (Judd 2011; Krzeminski 2013)

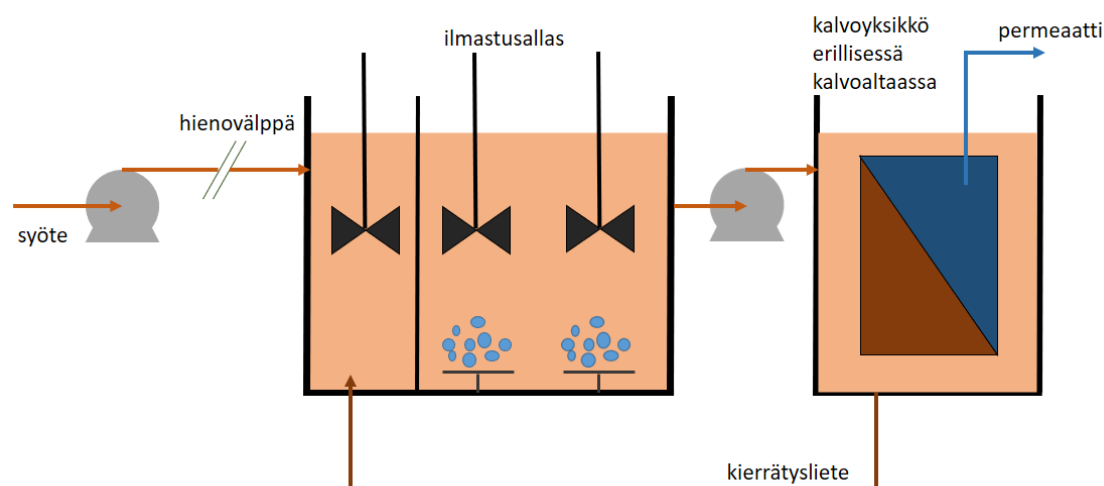


Kuva 6. Erillinen kalvovyksikkö aktiivilieteprosessin jälkeen (mukaillen Judd & Judd Ltd 2018g)

Lietteeseen upotettavissa kalvovyksiköissä käytetään tasomaisia kalvoja tai onttokuitukalvoja. Kalvot voidaan sijoittaa suoraan aktiivilieteprosessiin ilmastusaltaan nitrifioivaan lohkoon (kuva 7) tai ne voidaan sijoittaa erilliseen kalvoaltaaseen heti ilmastusaltaiden jälkeen (kuva 8). Erillisestä kalvoaltaasta lietettä kierrätetään takaisin aktiivilieteprosessiin. Kalvoja pidetään puhtaana karkea kupla –ilmastuksella, joka toteutetaan ilmastusaltaassa normaalilla ilmastuksella tai erillisessä kalvoaltaassa syöttämällä ilmaa kalvokasettien alaosaan. Lietteeseen upotetuille kalvovyksiköille on tyypillistä pienempi energian tarve, sillä lietettä ei tarvitse pumpata ollenkaan tai niin pitkiä matkoja kalvoille kuin erilliseen kalvovyksikköön. Lisäksi suodatuksen vaadittava kalvopaine-ero on pienempi. (Judd 2011; Krzeminski 2013)



Kuva 7. Lietteeseen upotettu kalvovyksikkö ilmastusaltaan nitrifioivaan lohkoon (mukaillen Judd & Judd Ltd 2018g)



Kuva 8. Lietteeseen upotettu kalvovyksikkö sijoitettuna erilliseen kalvoaltaaseen (mukaillen Judd & Judd Ltd 2018g)

## 5.2 MBR-tekniikka Suomen jätevedenpuhdistamoilla

Suomessa kesän 2018 käyttöönotetuilla MBR-laitoksilla Taskilassa, Parikkalassa ja Viitasaarella on tehty hieman toisistaan poikkeavia ratkaisuja koskien MBR-prosessin toteutusta. Parikkalassa ja Viitasaarella on käytössä Alfa Laval –kalvovalmistajan tasomaiset PVDF-polymeerikalvot, joissa huokoskoko on  $0,2\ \mu\text{m}$ . Taskilassa on käytössä Suez Water Technologies & Solutions –kalvovalmistajan onttokuitukalvot PVDF-polymeeristä, joissa huokoskoko on  $0,04\ \mu\text{m}$ .



Parikkalassa Särkisalmen jätevedenpuhdistamolla kalvot sijaitsevat ilmastusaltaiden jälkeen olevassa kalvosuodatuslohkoissa, jotka ovat osa ilmastusaltaiden biologista prosessia. Prosessi toimii kaksilinjaisena, ja molemmissa linjoissa on neljä kappaletta Alfa Laval –kalvomodulia. Yhden modulin kalvoala on  $462 \text{ m}^2$ , jolloin MBR-prosessin kokonaiskalvoala on  $3\,696 \text{ m}^2$ . Ilmastuksesta liete johdetaan kalvolohkoille painovoimaisesti ylivuotokourun kautta. Kalvolohkoista kierrätysliete pumpataan ilmastusaltaiden alkuun deox-lohkoihin (hapenpoistolohkot). Parikkalan MBR-prosessin mitoitusvirtaama on  $70 \text{ m}^3/\text{h}$  ja hetkellinen maksimivirtaama voi olla noin  $80 - 90 \text{ m}^3/\text{h}$ . Vanha puhdistusprosessi on poistettu käytöstä MBR-prosessin käyttöönoton jälkeen. Laitokselle maksimivirtaama on  $140 \text{ m}^3/\text{h}$ , joten MBR-prosessin mitoituksen ylittävä virtaamaosuus johdetaan vanhoihin jälkiselkeytysaltaisiin, jotka toimivat nyt tasausaltaina. Tasausaltailta jätevesi pumpataan myöhemmin esikäsittelyn kautta biologiseen prosessiin. (Venejärvi 2019)

Viitasaaren jätevedenpuhdistamolla kalvot on sijoitettu kahteen erilliseen kalvoaltaaseen, jonne jätevesi pumpataan ilmastuksen lopusta uppopumpuilla. Lietettä pumpataan noin viisinkertaisesti suhteessa tulovirtaamaan ja ylimääräinen liete kierrätetään kalvoaltaista deox-altaiden kautta takaisin ilmastusaltaille. MBR-prosessi toimii neljälinjaisena, ja kalvoaltaisiin on asennettu yhteensä 12 kappaletta Alfa Laval –kalvomodulia. Yhden modulin kalvoala on  $462 \text{ m}^2$ , joten MBR-prosessin kokonaiskalvoala on  $5\,544 \text{ m}^2$ . Suodatus tapahtuu imupumppauksella. Puhdistamon tulovirtaama sekä suodatukselta poistuva virtaama ovat keskimäärin noin  $35 \text{ m}^3/\text{h}$ . Viitasaaren MBR-prosessin mitoitusvirtaama on  $70 \text{ m}^3/\text{h}$ . Kesällä maksimipäivävirtaama voi olla jopa  $2\,400 \text{ m}^3/\text{h}$  ja hetkellinen maksimivirtaama noin  $120 \text{ m}^3/\text{h}$ . Kaikki puhdistamolle tuleva vesi kulkee suodatuksen läpi, mutta huippuvirtaamien aikana on mahdollisuus selkeyttää aktiivilietettä vanhoissa selkeytysaltaissa kalvosuodatuksen rinnalla. (Lignell 2018)

Oulussa Taskilan jätevedenpuhdistamolla kalvot sijaitsevat neljässä erillisessä kalvoaltaassa kahden ilmastuslinjan jälkeen. Kalvoaltaille liete pumpataan ilmastusaltaiden viimeisestä lohkoista. Kalvoaltailta kierrätysliete johdetaan ylivuotona takaisin ilmastusaltaiden ensimmäiseen hapettomaan lohkoon. MBR-prosessi toimii neljälinjaisena, ja MBR-yksikössä on yhteensä 32 kalvokasettia, joiden kokonaissuodatusala on  $48\,949 \text{ m}^2$  (eli  $1\,530 \text{ m}^2$  per kasetti). Taskilassa MBR-yksikkö toimii perinteisen aktiivilieteprosessin rinnalla, ja MBR-yksikön keskivirtaama on

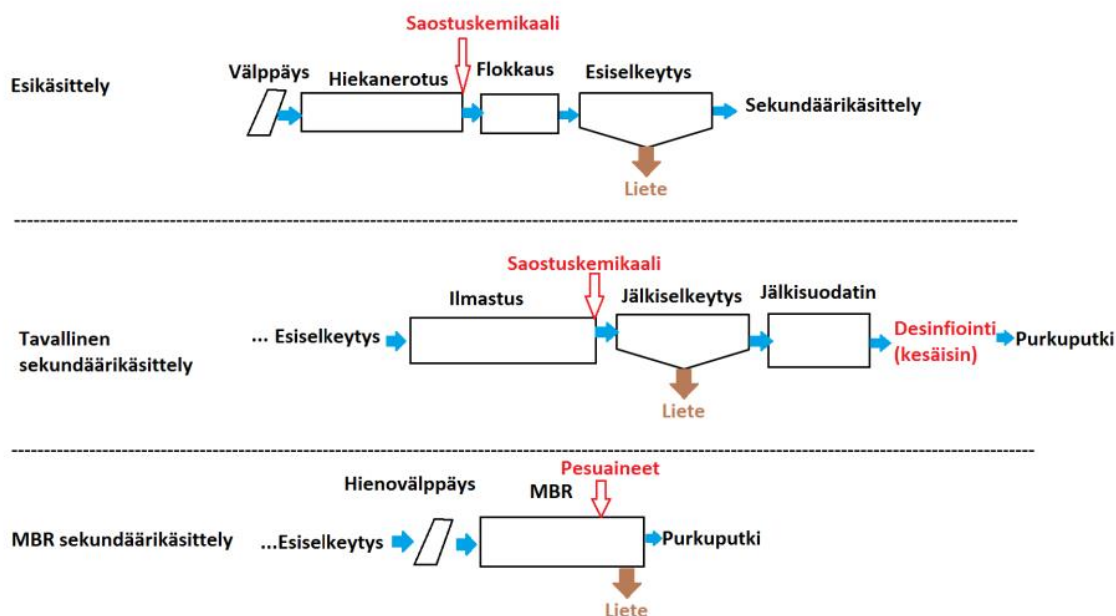
864 m<sup>3</sup>/h. Taulukossa 4 on koottuna Taskilan, Parikkalan ja Viitasaaren MBR-prosessin yksityiskohtia kalvoista ja suodatuksen toiminnasta.

Taulukko 4. MBR-prosessin yksityiskohtia Taskilan, Parikkalan ja Viitasaaren jätevedenpuhdistamoilla

	Taskila	Parikkala	Viitasaari
Kalvovalmistaja	Suez	Alfa Laval	Alfa Laval
Kalvotyyppi	onttokuitukalvo	tasomainen kalvo	tasomainen kalvo
Huokoskoko	0,04 µm	0,2 µm	0,2 µm
Kalvojen sijoittelu	4 kpl erillistä kalvoallasta	2 kpl kalvosuodatuslohkoa osana ilmastusaltaita	2 kpl erillistä kalvoallasta
Kalvoala	48 949 m <sup>2</sup>	3 696 m <sup>2</sup>	5 544 m <sup>2</sup>
Tulovirtaama MBR-prosessiin	keskivirtaama: 864 m <sup>3</sup> /h	mitoitusvirtaama: 70 m <sup>3</sup> /h	mitoitusvirtaama: 70 m <sup>3</sup> /h

## 6 MBR TASKILAN JÄTEVEDENPUHDISTAMOLLA

Oulun Veden Taskilan jätevedenpuhdistamoa on laajennettu käsittelykapasiteetin lisäämiseksi sekä jätevedenpuhdistuksen tehostamiseksi. Pohjois-Suomen ympäristölupaviraston myöntämän ympäristöluvan mukaisia lupamääräyksiä ja puhdistustavoitteita silmällä pitäen sekä erityisesti typenpoiston tehostamiseksi, Taskilan laajennuksen prosessiratkaisuksi valikoitui MBR-kalvosuodatus tekniikka. MBR-prosessissa voidaan pitää pidempää lieteikää sekä korkeampaa lietepitoisuutta kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa, mikä mahdollistaa tehokkaamman typenpoiston myös alhaisemmissa lämpötiloissa (Judd 2011). Puhdistamon nykyisen biologisen prosessin rinnalle rakennettiin laajennusosana MBR-yksikkö, jolle johdetaan osa esiselkeytetystä jätevedestä. Uuden MBR-yksikön puhdistusprosessi koostuu hienovälppäyksestä, aktiivilietteeseen perustuvasta ilmastusprosessista sekä MBR-kalvosuodatusprosessista. Taskilan jätevedenpuhdistamon MBR-yksikkö otettiin käyttöön lokakuussa 2018. Taskilan jätevedenpuhdistamon laajennuksen jälkeen tuleva jätevesi esikäsitellään yhteisesti, jonka jälkeen vesi johdetaan sekundaarikäsittelyyn perinteiseen puhdistusprosessiin sekä MBR-yksikköön. Jätevedenpuhdistamon prosessikaavio on esitettyä kuvassa 9.

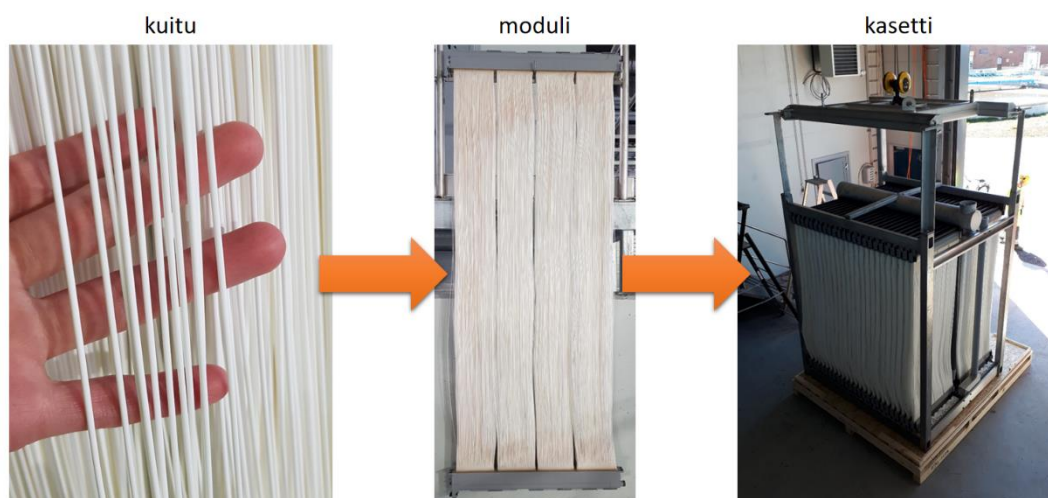


Kuva 9. Taskilan jätevedenpuhdistamon prosessikaavio MBR-prosessin käyttöönoton jälkeen

Jäteveden esikäsittely muodostuu välppäyksestä, hiekanerotuksesta, flokkauksesta ja esiselkeytyksestä. Esikäsittelystä esiselkeytetty vesi johdetaan ruuvipumppauksen jälkeen perinteiseen sekundäärikäsittelyyn sekä MBR-yksikössä tapahtuvaan sekundäärikäsittelyyn. Perinteinen sekundäärikäsittely muodostuu ilmastuksesta, jälkiselkeytyksestä sekä jälkisuodatuksesta. Kesäaikaan lähtevä puhdistettu vesi vielä desinfioidaan. MBR sekundäärikäsittelyssä esiselkeytetty vesi johdetaan hienovälppien läpi ilmastusaltaille ja edelleen MBR-kalvosuodatuksen läpi puhdistettuna vetenä mereen. Perinteisen puhdistusprosessin ja MBR-prosessin lähtevän veden purkuputket yhdistyvät ennen purkua mereen. Perinteisessä aktiivilieteprosessissa lietteen erottaminen tapahtuu jälkiselkeytyksessä laskeuttamalla, kun taas MBR-prosessissa kalvosuodatuksessa. MBR-prosessissa puhdistettu vesi johdetaan sellaisenaan pois laitokselta puhdistettuna jätevetenä ja suodatuksessa erotettu liete palautetaan takaisin prosessiin.

## 6.1 Taskilan MBR-yksikkö

Taskilan jätevedenpuhdistamon MBR-yksikössä on käytössä Suez Water Technologies & Solutions –kalvovalmistajan ZeeWeed 500D –onttokuitukalvot, jotka toimivat ultrasuodatuksen periaatteella huokoskoon ollessa  $0,04\ \mu\text{m}$ . MBR-yksikössä pääroolissa ovat neljä aktiivilieteprosessista erillistä kalvoallasta (MBR-linjat), joissa kalvokasetit ovat upotettuina jäteveeteen. Kalvoaltaiden tilavuus on noin  $280\ \text{m}^3$ . Kalvokasettien pääkomponentit on esitetty kuvassa 10. Kasetit muodostuvat yksittäisistä moduleista, joissa onttokuitukalvot ovat kiinnitettyinä molemmista päistään. (Hyxo Oy 2018b)



Kuva 10. Kalvokasetin komponentit

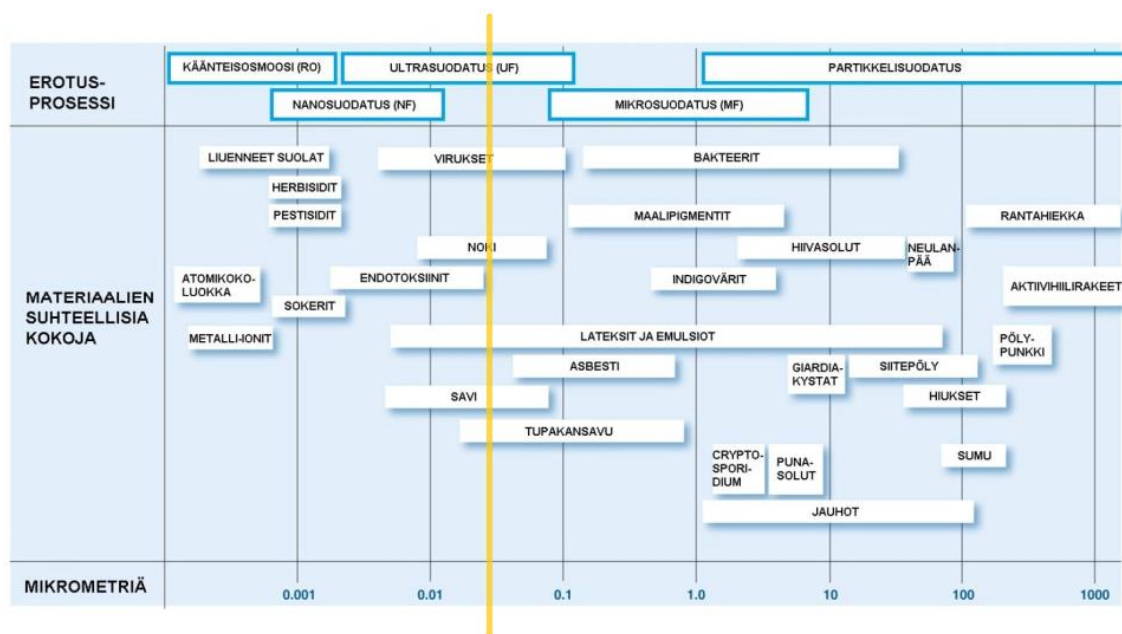
Taskilan MBR-yksikön jokaisessa neljässä MBR-linjassa on asennettuna kahdeksan kalvokasettia, yhteensä siis 32 kasettia. Jokaiselle linjalle on lisäksi vielä jätetty kaksi vapaata paikkaa kalvokaseteille laajennusvaraksi. Kalvokasetteihin voidaan asentaa yhteensä 48 modulia. Jokaisessa linjassa on kuusi kasettia, jotka on asennettu täyteen, ja kaksi kasetista on jätetty vajaaksi (laajennusvara). Vajaissa kaseteissa on asennettuna 34 modulia. Kokonaisuudessaan Taskilan MBR-yksikössä on 1 424 modulia, 356 jokaisella linjalla. Moduli koostuu yhteensä noin 2 880 kuidusta, joissa kalvomateriaalina on käytetty polyvinyyliideenifluoridia (PVDF). Koko MBR-yksikön suodatuspinta-ala on yhteensä 48 949 m<sup>2</sup> eli jokaisen modulin suodatuspinta-ala on noin 34,4 m<sup>2</sup>. Laajennusvaraa MBR-yksikköön on jätetty 25,8 %, kun huomioidaan vajaat kasetit sekä tyhjät kasettien paikat MBR-linjoilla. (Hyxo Oy 2018b) Taulukossa 5 on yhteenveto Taskilan MBR-yksikön järjestelmän rakenteesta.

Taulukko 5. Yhteenveto Taskilan MBR-yksikön järjestelmän rakenteesta

Parametri	Arvo
Kalvo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ZeeWeed 500D –onttokuitukalvo</li> <li>- materiaali: PVDF, polyvinyyliideenifluoridi</li> <li>- huokoskoko: 0,04 µm</li> </ul>
MBR-yksikkö	<ul style="list-style-type: none"> <li>- suodatuspinta-ala yhteensä: 48 949 m<sup>2</sup></li> <li>- ylimääräinen kapasiteetti (laajennusvara): 25,8 %</li> </ul>
MBR-linja	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lukumäärä: 4 kpl</li> <li>- tilavuus: 280 m<sup>3</sup></li> <li>- kasettien lukumäärä: 8 per linja</li> </ul>
Kasetti	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kasettien kokonaismäärä: 32 kpl</li> <li>- täydet kasetit: 6 per linja, yhteensä 24 kpl</li> <li>- vajaat kasetit: 2 per linja, yhteensä 8 kpl</li> </ul>
Moduli	<ul style="list-style-type: none"> <li>- modulien kokonaismäärä: 1 424 kpl, 356 per linja</li> <li>- 48 modulia täydessä kasetissa</li> <li>- 32 modulia vajaassa kasetissa</li> <li>- suodatuspinta-ala 34,4 m<sup>2</sup> per moduli</li> <li>- kuitujen lukumäärä noin 2 880 per moduli</li> </ul>

### 6.1.1 ZeeWeed 500D –onttokuitukalvo

Taskilassa käytössä olevat ZeeWeed 500D –onttokuitukalvot ovat upotettuina jäteveteen, jolloin pienellä alipaineella vesi kulkee kuitujen ulkopuolelta kalvon läpi kuidun sisälle. Kalvon huokoskoko on  $0,04\ \mu\text{m}$ , joka on merkittynä kuvaan 11 oranssina viivana veden suodatusspektriin. Viivan oikealle puolelle jäävät kiintoaineet ja kolloidit suodattuvat jätevedestä. Tällöin ZeeWeed 500D –kalvoilla voidaan erottaa jätevedestä muun muassa bakteerit, solut, osa viruksista sekä muut isoimmat partikkelit. Kalvon läpi pääsevät huokoskoko pienemmät partikkelit, jotka jäävät kuvassa viivan vasemmalle puolelle. Näitä ovat esimerkiksi pienimmät virukset, atomikokoluokan partikkelit sekä liuenneet aineet.



Kuva 11. Veden suodatusspektri, jossa on merkittynä ZeeWeed 500D -kalvon huokoskoko  $0,04\ \mu\text{m}$  (mukaillen Lignell et al. 2015)

Onttokuitukalvo koostuu tukirakenteesta ja sen päällä olevasta kalvosta. Kuidun rakenne ja sen ontto keskusta näkyvät kuvassa 12. Tukirakenteena toimii kudottu ontto nylon, joka antaa kalvolle sen rakenteen, muodon sekä vetolujuuden. Kalvomateriaali on polyvinyyliideenifluoridi (PVDF), joka on ominaisuuksiltaan hydrofiilinen ja ioniton. PVDF-kalvo itsessään on todella ohut pintakerros nylon tukirakenteen pinnalla. PVDF on tällä hetkellä yksi käytetyimmistä MBR-kalvomateriaaleista, koska sillä on hyvä kemikaalikestävyys ja se voi toimia laajalla pH-alueella. PVDF on erityisesti kestävä ja joustava, mitkä ovat hyviä ominaisuuksia suodattaessa jätevettä. Lisäksi PVDF kestää korkeita lämpötiloja ja klooripitoisuuksia, jolloin kalvojen pesukemikaalina voidaan

käyttää tehokasta natriumhypokloriittia. ZeeWeed 500D –onttokuitukalvon ulkohalkaisija on 1,9 mm ja sisähalkaisija 0,8 mm. Kuidun onttoa sisustaa, jossa permeaatti virtaa, kutsutaan nimellä lumen. Onttokuitukalvot ovat rakenteeltaan kestäviä, ja niiden vetolujuus on suuri, mutta kuidun päällä oleva kalvo on herkkä suurille partikkeleille sekä mekaaniselle kulutukselle. (Judd 2011; Suez Water Technologies & Solutions 2017a)



Kuva 12. ZeeWeed 500D –onttokuitukalvo

### 6.1.2 Kasetit ja modulit

Onttokuitukalvot ovat kiinnitettyinä molemmista päistään modulin jakotukkeihin, joiden kautta puhdistettu vesi eli permeaatti johdetaan kasetin yläosassa olevaan permeaatin runkoputkeen. Kasetit tukevat moduleja, jotka on asennettu pystysuuntaan rinnakkain kasetin ylä- ja alatukeen. Kasetit koostuvat vahvistetusta teräsrungosta, permeaattiputkistosta sekä kasetin pohjalla olevasta ilmastusyksiköstä. Modulien jakotukit on yhdistetty halkaisijaltaan 5,08 cm:n (2") PVC-pystyputkilla permeaatin jakotukkiin, jonka halkaisija on 20,32 cm (8"). (Hyxo Oy 2018b) Permeaatin jakotukki yhdistyy MBR-linjakohtaiseen permeaattilinjaan ja edelleen permeaatin runkolinjaan,



jossa yhdistyy jokaiselta MBR-linjalta tullut permeaatti. Permeaatti johdetaan runkolinjaa pitkin permeaattialtaaseen, josta puhdistettu vesi lähtee ylivuotona purkuputkea pitkin mereen.

Kuvassa 13 on täyteen ladattu kasetti, johon on asennettu 48 modulia, eli 24 modulia rinnakkain kasetin molemmille puolille. Permeaatin jakotukki on kuvassa poikittain kasetin yläosassa moduleiden päällä. Modulien jakotukit yhdistävät PVC-pystyputket ovat modulien välissä kasetin keskellä. Kasetin yläreunan kulmiin on kiinnitetty teräspalkit, joiden varassa kasetti lasketaan jäteveteen kalvoaltaaseen. Kasetti roikkuu siis palkkien varassa vedessä, jolloin kasetin ja pohjan väliin jää tyhjää tilaa. Kuvassa 14 on vajaa kasetti, johon on asennettu 34 modulia. Vajaaseen kasettiin on rinnakkain asennettu 17 modulia, kasetin molemmille puolille. Taulukossa 6 on modulin ja kasetin fyysisiä ominaisuuksia.



Kuva 13. Täysi kasetti, 48 modulia





Kuva 14. Vajaa kasetti, 34 modulia

Taulukko 6. Modulin ja kasetin fyysisiä ominaisuuksia (Hyxo Oy 2018b)

Parametri	Arvo
Modulin mitat	- korkeus 219,8 cm - leveys 84,4 cm - syvyys 4,9 cm
Kasetin mitat	- korkeus 261,5 cm - leveys 174,5 cm - syvyys 212,2 cm
Kasetin paino	1 802 – 4 250 kg, riippuu kiintoaineen keraantymisestä ja modulien lukumäärästä

### 6.1.3 MBR-linja

Kahdelta ilmastusaltaalta jätevesi nostetaan kuilupumpuilla neljälle MBR-kalvoaltaalle eli MBR-linjalle. Onttokuitukalvojen sisälle luodaan permeaattipumpulla pieni alipaine, jonka avulla vesi imetään kalvojen ulkopuolelta kuidun sisälle ja edelleen permeaattilinjaan. Jokaisella linjalla on oma permeaattipumppu sekä permeaatti- ja ilmalinja, jotka yhdistyvät isommiksi runkolinjoiksi. Kalvoaltaille tuotetaan MBR-ilmastusilmakompressoreilla ilmaa, joka ohjataan runkolinjaa pitkin jokaisen MBR-linjan ilmalinjaan ja edelleen jaetaan tasaisesti kasettien alapuolelle. Tämä kalvoilmastus pitää kalvojen pinnan puhtaana epäpuhtauksista, koska liete on jatkuvassa pyörrevirtauksessa. MBR-yksikön toiminnasta huolehtii ohjausjärjestelmä, jonka avulla MBR-yksikkö toimii automaattisesti.

Taskilan jätevedenpuhdistamon laajennukseen kuului myös ilmastuskompressoreiden uusiminen. Kaikille viidelle ilmastuslinjalle, perinteiseen aktiivilieteprosessiin sekä MBR-prosessiin, tuotetaan ilma neljällä yhteisellä kompressorilla. MBR-yksikön ilmastusaltaat on toteutettu ulkoaltaina vastaavasti kuin perinteisen aktiivilieteprosessin linjat. MBR-yksikön hienovälppäys ja kalvosuodatus on rakennettu sisätiloihin. Lisäksi MBR-hallissa kalvoaltaat on peitetty kansilla, mikä helpottaa hallissa liikkumista, huoltotoimenpiteiden suorittamista sekä vähentää hajuhaittoja. Kuvassa 15 on Taskilan jätevedenpuhdistamon ilmakehän laajennuksen jälkeen kesällä 2018. MBR-halli ja MBR-yksikön ilmastusaltaat ovat puhdistamoalueen pohjoisosassa (kuvassa alueen yläosassa). Kuvasta nähdään myös yksi MBR-tekniikan hyödyistä, pieni tilantarve. MBR-hallin ja kahden uuden ilmastusaltan tilantarve on paljon pienempi kuin perinteiseen sekundäärikäsittelyyn kuuluvien kolmen ilmastuslinjan, kolmen jälkiselkeytysaltan sekä kuuden jälkisuodattimen tilantarve.



Kuva 15. Taskilan jätevedenpuhdistamon ilmakuva kesällä 2018

## 6.2 MBR-yksikön mitoituskormitus

Taskilan MBR-yksikön mitoitus on toteutettu ottamalla huomioon ensi sijassa kesäaikaisen typenpoiston mittaustietoja, mutta laajennusvaraus ympärivuotiselle typenpoistolle on otettu huomioon kaikissa tarvittavissa kohdissa. Jätevesi johdetaan rakennetuille uusille ilmastuslinjoille ruuvipumppauksen jälkeen käyttäen kyseiselle putkelle aiemmin jätettyä tilavarausta. MBR-yksikköön menevän putken halkaisija on 800 mm, mikä mahdollistaa noin 2 000 m<sup>3</sup>/h maksimivirtaaman. Suunnitteluvaiheessa on esitetty kolme eri mitoitustilannetta, joissa jakosuhte MBR-yksikön ja perinteisen aktiivilieteprosessin välillä vaihtelee. Esisuunnitelmassa on esitetty jakosuhteet 25, 35 ja 50 %. Ensimmäisessä vaihtoehdossa kuorma olisi jaettu tasan nykyisille kolmelle aktiivilietelinjalle sekä MBR-yksikön aktiivilieteprosessiin. Tällöin 25 % esiselkeytetystä vedestä olisi johdettu MBR-yksikköön. Toisessa vaihtoehdossa kuormaa jaetaan suhteessa enemmän MBR-yksikön aktiivilietelinjoille (35 %), jolloin lietemäärä on 1,5-kertainen nykyisiin ilmastusaltaisiin verrattuna. Kolmas vaihtoehto on ympärivuotista typenpoistoa varten, jolloin 50 % esiselkeytetystä vedestä olisi johdettu MBR-yksikköön. (FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy 2016)

Mitoitustarkastelun lähtökohtana on pidetty vuoden 2030 ennustettua tulokuormitusta. MBR-yksikön osalta suunnittelu ja mitoitus on saatettu loppuun ainemäärän jakosuhteella 35 % varautuen samankokoisen yksikön rakentamiseen myöhemmin ympärivuotisen typenpoiston onnistumiseksi. Taskilan ennustettu tulokuormitus sekä MBR-yksikön mitoituskuormitus jakosuhteella 35 % esiselkeytetystä vedestä on esitetty taulukossa 7. (FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy 2016) MBR-yksikön toteutuneet virtaama-arvot ovat päivittyneet mitoitusarvoista valitun kalvotekniikan perusteella.

Taulukko 7. Ennustettu tulokuormitus vuodelle 2030 ja MBR-yksikön mitoituskuormitus (FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy 2016)

Parametri	Yksikkö	Tulokuormitus 2030	MBR-yksikön mitoituskormitus, osuus 35 %
Keskivirtaama $Q_{ka}$	m <sup>3</sup> /d	53 000	18 500
Maksimivirtaama $Q_{max}$	m <sup>3</sup> /d	93 900	32 500
Keskivirtaama $q_{ka}$	m <sup>3</sup> /h	2 200	770
Mitoitusvirtaama $q_{mit}$	m <sup>3</sup> /h	2 900	1 000
Maksimivirtaama $q_{max}$	m <sup>3</sup> /h	5 080	1 500 ( $T_{pros} > 12^{\circ}C$ ), 1 000 ( $T_{pros} < 12^{\circ}C$ )
BOD <sub>7ATU</sub>	kg/d	14 600	3 580
	mg/l	280	190
COD <sub>Cr</sub>	kg/d	36 600	8 050
	mg/l	690	430
Kiintoaine	kg/d	24 000	4 200
	mg/l	450	230
Kokonaistyyppi	kg/d	3 300	1 100
	mg/l	62	59
Kokonaisfosfori	kg/d	550	96
	mg/l	10,4	5,2
BOD/N -suhde		4,4	3,3

### 6.3 MBR-hanke ja käyttöönotto

Taskilan jätevedenpuhdistamon laajennuksesta sekä MBR-hankkeesta tehtiin päätös vuoden 2016 alussa. Tämän jälkeen aloitettiin MBR-hankkeen toteutussuunnittelu FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n toimesta. Syksyn 2016 aikana valittiin suodatinurakan MBR-urakoitsijaksi (kokonaisvastuurakentamisen urakka, KVR) kilpailutuksen jälkeen Hyxo Oy, joka vastasi MBR-yksikön kalvoyksiköistä ja siihen liittyvistä osioista. Muut urakoitsijat valittiin käytettävän kalvotekniikan valinnan ja suunnittelun jälkeen vuonna 2017. Pääurakoitsijana toimiva rakennusurakoitsija valittiin kesäkuussa, ja heinäkuussa valittiin LVI-urakoitsija, koneistourakoitsija, sähkö- ja instrumentointiurakoitsija sekä automaatiourakoitsija. MBR-yksikön maanrakennustyöt aloitettiin jo kesäkuun 2017 aikana.

MBR-yksikön käyttöönoton aikataulu on esitettynä kuvassa 16. Kalvokasetit saapuivat Ouluun kesäkuun 2018 aikana ja varsinainen käyttöönotto alkoi heinäkuun alussa viikolla 27 kalvokasettien asennuksella. Tässä vaiheessa kalvot laskettiin puhtaaseen veteen. Kalvokasettien asennuksen yhteydessä kalvot huuhdeltiin glyseriinistä ja niille suoritettiin kalvotarkastukset. Glyseriini toimi kalvojen suoja-aineena kuljetuksen ja välivarastoinnin aikana. Kalvojen kunto arvioitiin vaurioiden varalta ja vuotokohdat määritettiin kuplatestien avulla, minkä jälkeen rikkoonuneet kuidut paikattiin.

Kalvoasennusten ja -tarkastusten jälkeen aloitettiin automaatiotestaukset viikolla 29. Tällöin MBR 4 –linjaa käytettiin testaukseen suodattamalla puhdasta vettä, ja viereistä MBR 3 –linjaa ohjattiin manuaalisesti veden säilyttämiseksi prosessissa. Automaation sekvensseihin tehdyt muutokset siis tehtiin ensin linjalle 4, jonka jälkeen ne kopioitiin muille linjoille testausten jälkeen. Suurimmat sekvenssimuutokset tehtiin automaatiotestausten alussa, mutta pientä automaation hienosäätöä on tehty koko käyttöönoton aikana sekä vielä käyttöönoton jälkeenkin.

Viikolla 34 ilmastusaltaat 4 ja 5 täytettiin jätevedellä. Jätevettä ohjattiin uusille ilmastuslinjoille MBR-yksikön hienovälppien läpi esiselkeytyksestä sekä perinteisen aktiivilieteprosessin ilmastuslinjalta 3. Noin viikon aktiivilietteen kasvun jälkeen viikolla 35 johdettiin jätevettä kalvoaltaille. Tällöin automaatiotestauksia jatkettiin suodattamalla jätevettä. Syyskuun ajan MBR-linjat olivat suodatuskäytössä päiväsaikaan automaatiotestauksien aikana. Yöaikaan ja viikonloppuisin MBR-linjat olivat lepotilassa.

Lokakuun 3. päivä lähtien MBR-linjat ovat olleet suodatuskäytössä ympäri vuorokauden. Tämän jälkeen aloitettiin viikon mittainen häiriötön koekäyttö, 4. – 11.10.2018. Häiriöttömän koekäytön jälkeen järjestettiin kaikkien urakoitsijoiden kesken vastaanottotarkastus 12. lokakuuta.

Hieman limittäin häiriöttömän koekäytön aikana, järjestettiin kesäajan takuuajo (*performance test*), jonka tarkoituksena oli seurata MBR-kalvosuodatuksen toimintaa yli 12 °C:een lämpötilassa kesäajan virtaamilla. Lisäksi päivittäin tehtiin Oulun Veden omavalvontalaboratoriossa takuuajoon kuuluvat analyysit. Kesäajan takuuajo suoritettiin 10. – 13. lokakuuta. Takuuajon aikana jokaisen vuorokauden päätteeksi kirjattiin ylös lukemat MBR-yksikön tulevasta virtauksesta, MBR-linjojen virtauksista, kemikaalien kulutuksesta sekä permeaattipumppujen tehonkulutuksesta. Näiden lisäksi tunneittain kirjattiin ylös online-mittareiden lukemat ilmastusaltailta sekä permeaattialtaasta. Takuuajon ajalta kirjattiin ylös muistiinpanot mahdollisista automaation häiriöistä sekä huomioista suodatuksen toiminnassa. Vastaava talviajan takuuajo tullaan suorittamaan helmi-maaliskuussa 2019. Takuuajo suoritetaan talviajan virtaamilla, kun veden lämpötila on alle 10 °C.

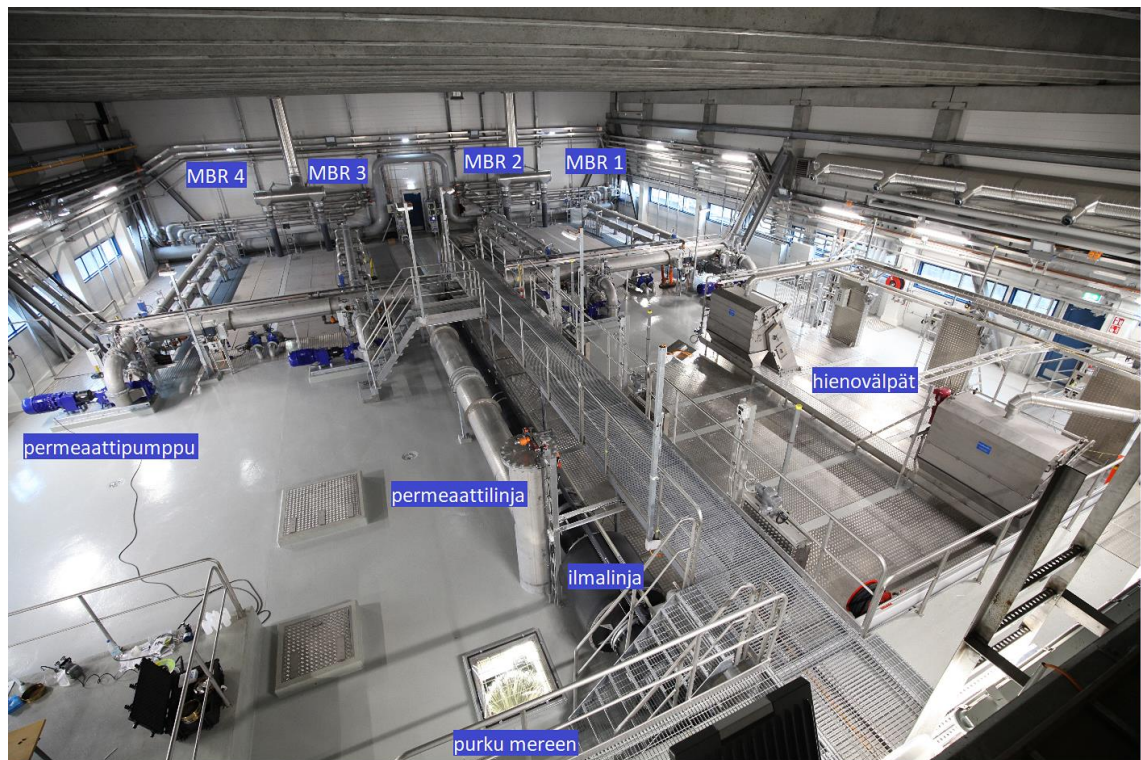
	Heinäkuu				Elokuu					Syyskuu				Lokakuu	
vko	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Kalvoasennukset															
Kalvotarkistukset															
Automaatio-testaukset															
Ilmastusaltaan täyttö jätevedellä															
Jätevesi kalvoaltaille															
MBR ajossa ympäri vuorokauden														3.10. alkaen	
Häiriötön koekäyttö (1 viikko)														4.-11.10.	
Vastaanotto-tarkastus														12.10.	
Kesäajan takuuajo (3 vrk)														10.-13.10.	

Kuva 16. MBR-yksikön käyttöönoton aikataulu heinä-lokakuussa 2018



## 7 TASKILAN MBR-YKSIKÖN PROSESSIKUVAUS

Taskilan jätevedenpuhdistamolla esiselkeytetty vesi nostetaan ilmastuksen tulopumppaamon ruuvipumpuilla yhteiseen kanavaan, josta vesi jaetaan perinteiseen aktiivilieteprosessiin ilmastuslinjoille 1 – 3 sekä MBR-yksikön ilmastuslinjoille 4 ja 5. Ennen MBR-yksikön ilmastuslinjoja, jätevesi käsitellään hienovälpillä karkeimman kiintoaineksen poistamiseksi. Ilmastusaltailta vesi nostetaan kalvoaltaille, joista suodatettu vesi johdetaan permeaattialtaaseen ja edelleen purkuputkea pitkin mereen. Kalvoaltailta liete kiertää takaisin ilmastusaltaisiin, joista poistetaan ylijäämälietettä sopivan lieteiän ja kiintoainepitoisuuden ylläpitämiseksi. Kuva 17 on MBR-hallista, jossa on merkittynä kalvosuodatusprosessiin liittyvät tärkeimmät komponentit. Hienovälpkien läpi kulkenut vesi ohjataan hallin keskellä olevaa kanavaa pitkin MBR-kalvoaltaiden välistä hallin ulkopuolelle ilmastusaltaille.



Kuva 17. Taskilan jätevedenpuhdistamon MBR-halli

Taskilan MBR-yksikön automaatiojärjestelmään on rakennettu kolme erillistä sekvenssiä jokaiselle neljälle linjalle: suodatus-, ylläpitopesu- ja liuotuspesusekvenssi. MBR-linjalla on siis jokin näistä sekvensseistä päällä tai linja on kiinni (pois käytöstä). Suodatussekvenssin sisällä on kolme tilaa: suodatus, vastavirtahuuhtelu sekä standby-tila. Pääsääntöisesti linja on suodatustilassa ja vastavirtahuuhtelu tapahtuu niin kutsutun

suodatussyklin päätteeksi, jolloin vastavirtahuuhtelun ajaksi permeaattipumpun suunta käännetään kalvoille päin ja permeaattia pumpataan vastakkaiseen suuntaan, kalvojen sisäpuolelta kalvojen läpi takaisin kalvoaltaaseen. Suodatussyklin aikana on jatkuva kalvoilmastus, jolla kalvoja ilmastetaan kasettien alapuolelta. Suodatuksen standby-tila on linjan lepotila, jossa linja on valmiudessa nousemaan takaisin suodatustoimintaan, kun suodatuskapasiteetti on riittävä vähemmällä kuin neljällä linjalla. Suodatuskapasiteettia lasketaan plant demand –laskennalla. Suodatussekvenssi ja sen sisällä siirtyminen suodatuksen, vastavirtahuuhteluun sekä standby-tilaan toimivat automaattisesti. Ylläpitopesusekvenssi käynnistetään automaattisesti ajastetusti tai manuaalisesti 1 – 3 kertaa viikossa jokaiselle linjalle. Ylläpitopesuun siirrytään yleensä suodatussekvenssin kautta automaattisesti tai manuaalisesti, mutta se voidaan myös käynnistää manuaalisesti linjalle, joka on pois käytöstä. Käynnistymisen jälkeen sekvenssi toimii automaattisesti. Liuotuspusekvenssi käynnistetään manuaalisesti 1 – 2 kertaa vuodessa jokaiselle linjalle. Liuotuspusekvenssi on puoliautomaattinen sekvenssi, sillä siihen sisältyy käsin tehtäviä vaihteita.

## 7.1 Hienovälppät

Kalvomateriaali on herkkä suurille partikkeleille sekä mekaaniselle kulutukselle, joten jäteveden esikäsittely ja hienovälppäys ovat erityisen tärkeä vaihe ennen kalvosuodatusta. MBR-yksikköön tuleva jätevesi kulkee kahden levynauhavälppän läpi. Välppien reikäkoko on 2 mm ja niiden tarkoituksena on erottaa karkein kiintoaines jätevedestä. MBR-yksikköön on jätetty tilavaraus myös kolmannelle välppälle mahdollista laajennusta varten.

Välppien toiminnan ohjaus tapahtuu automaatiolla perustuen aikaan sekä välppien tulo- ja lähtöpuolen kanavien pinnanmittauksiin. Pääsääntöisesti välppät toimivat tulo- ja lähtöpuolen pintaeron mukaan, jolloin välppät käynnistyvät asetettujen pintaerojen käynnistysrajojen perusteella. Kun pintaero saavuttaa käynnistysrajan 1, ensimmäisenä käynnistysvuorossa oleva välppä käynnistyy käynnistysviiveen (1 s) jälkeen. Jos tulopuolen pinta edelleen nousee ja pintaero saavuttaa käynnistysrajan 2, toisena käynnistysvuorossa oleva välppä käynnistyy käynnistysviiveen (1 s) jälkeen. Kun pintaero laskee käynnistysrajan alapuolelle, välppä pysäytetään 30 sekunnin jälkikäyntiajan jälkeen. Vastaavasti jos pintaero pysyy käynnistysrajan yläpuolella, välppä tai välppät käyvät yhtäjaksoisesti. Välppien käyntijakson jälkeen automaatio



vaihtaa niiden käynnistysjärjestystä. Välppä voi käynnistyä myös asetetun ajan perusteella, jos välppä ei ole käynyt pintaeron perusteella kyseisen ajanjakson aikana. Tällöin välppä käy 3 sekuntia, jos tulo- ja lähtöpuolen pintaero ei ole käynyt käynnistysrajan yläpuolella 30 minuutin aikana. (Palmunen 2018)

Välppien levynauhojen käynnistyessä käynnistyy samalla välppän pesuharja ja pesuvesiventtiili avautuu. Pesuvesiventtiili on auki asetetun aukioloajan (60 s), tai se suljetaan samanaikaisesti, kun välppä ja pesuharja pysähtyvät. Pesuharja on käynnissä aina välppän levynauhan käydessä. Välpiltä tuleva välpe siirretään välpekourua pitkin kyytiveden avulla välpepumppaamoon, josta se pumpataan kahdella pumpulla nykyiseen kaivoon ja edelleen hiekanerotukseen menevään kanavaan esikäsittelyn alkuun. (Palmunen 2018)

## 7.2 Ilmastusaltaat

MBR-yksikön aktiivilietekäsittely on toteutettu kaksialtaisena ilmastusprosessina, joissa luodaan optimaaliset olosuhteet muun muassa denitrifikaatio-nitrifikaatio –prosessille. Ilmastusaltaassa tapahtuu hiiliyhdisteiden ja ammoniumtypen hapettaminen. Mikrobien toiminnalle elintärkeä happi liuotetaan veteen ilmastusjärjestelmän avulla, jossa kompressoreilla tuotettu ilma johdetaan veteen ilmastusaltaan pohjassa olevien ilmastinlautasten kautta pieninä kuplina. Ilmastusaltaiden tilavuus on 2 250 m<sup>3</sup>/allas, jolloin uuden ilmastuksen kokonaistilavuus on 4 500 m<sup>3</sup>. Tällöin uusi ilmastus vastaa lähes tilavuudeltaan perinteisen aktiivilieteprosessin yhtä ilmastusallasta kolmesta, missä tilavuus on 5 000 m<sup>3</sup>/allas. Ilmastusaltaat on toteutettu vierekkäisinä suorakaiteen muotoisina ”U-altaina”, joissa jätevesi virtaa tulppavirtauksena. (FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy 2016; Palmunen 2018)

Kuvassa 18 on MBR-yksikön ilmastusaltaat: oikealla ilmastuslinja 4 ja vasemmalla ilmastuslinja 5. Jätevesi virtaa ilmastusaltaille kuvan alalaidasta keskeltä ja jakautuu tasaisesti molemmille linjoille. Ilmastuslinjoilla jätevesi virtaa altaiden takalaitaan kuvan keskellä olevien lohkojen kautta ja palaa ulkoreunalla olevien lohkojen läpi kohti ilmastusaltaan viimeistä lohkoa, josta jätevesi nostetaan kuilupumpuilla kalvoaltaille. Ilmastusaltaissa on seitsemän lohkoa, joista viisi sijaitsevat altaiden sisäreunassa ja kaksi altaiden ulkoreunassa. Lohkojen tilavuudet, toiminnot ja asennetut online-mittaukset on esitetty taulukossa 8.



Kuva 18. Taskilan jätevedenpuhdistamon ilmastuslinjat 4 ja 5

Taulukko 8. Ilmastuslinjojen 4 ja 5 lohkojen varustus (Palmunen 2018)

Lohko	Tilavuus [m <sup>3</sup> ]	Tila	Ilmastus	Mittaukset	Sekoitus
1	225	anoksinen	ei	pinnan korkeus	kyllä
2	225	anoksinen	ei	-	kyllä
3	225	anoksinen/ hapellinen	kyllä	happi	kyllä
4	225	anoksinen/ hapellinen	kyllä	happi	kyllä
5	225	anoksinen/ hapellinen	kyllä	happi, redox	kyllä
6	560	hapellinen	kyllä	happi	ei
7	560	hapellinen	kyllä	happi, kiintoaine, lämpötila, pH, ammoniumtyppi	ei
Yhteensä	2 250				

Ilmastuslinjan lohkojen 3, 4 ja 5 toimintaa voidaan muuttaa prosessin ajotavasta riippuen (esimerkiksi typenpoiston aikana) hapelliseksi tai hapettomaksi (anoksinen). Lohkoissa 1 – 5 on kolmelapaiset hidaskierroksiset mekaaniset sekoittimet, jotka ovat jatkuvasti käynnissä anoksisissa lohkoissa 1 ja 2 sekä lohkoissa 3 – 5 silloin, kun lohkot ovat anoksisina. Hapellisille lohkoille 3 – 7 on laskettu minimi- ja maksimi-ilmamäärät, jotka voidaan syöttää lohkoihin. Ilmamäärää säädetään lohkojen 3 – 7 happipitoisuusmittausten, ilmamäärämittausten sekä säätöventtiilien avulla. Pääsääntöisesti ilmamäärää säädetään lohkojen happipitoisuuden kaskadisäädöllä, jolloin veden happipitoisuuden säätö toimii pääsäätonä ja ilmamäärän virtaussäätö apusäätonä. Hapetysarvosta saadaan asetusarvo ilmamäärän virtaussäädölle, jonka mukaan lohkon syötettävää ilmamäärää säädetään säätöventtiilien avulla määritettyjen minimi- ja maksimi-ilmamäärien rajoissa. Ilmamäärää voidaan säätää myös ammoniumkaskadisäädöllä. Tällöin ilmastusaltaan lohkon 7 happipitoisuutta säädellään veden ammoniumpitoisuuden avulla, jota mitataan lohkoista 7. Lohkojen 3 – 6 happiasetusarvoja säädetään painokertoimella suhteessa happiasetusarvoon lohkoissa 7. Taskilan jätevedenpuhdistamolla ilmastuslinjojen 1 – 5 tarvitsema happi tuotetaan neljällä taajuusmuuttajakäyttöisellä turbo-ilmastuskompressorilla, jotka uusittiin MBR-hankkeen yhteydessä. Kompressoreilla tuotettu ilma johdetaan runkolinjaan, josta ilma jakautuu kaikille viidelle ilmastuslinjalle. Ilmastusaltaiden lohkon 6 voidaan syöttää saostuskemikaalina polyalumiinikloridia (PAC) liukoisen fosforin poistamisen tehostamiseksi. (FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy 2016; Palmunen 2018)

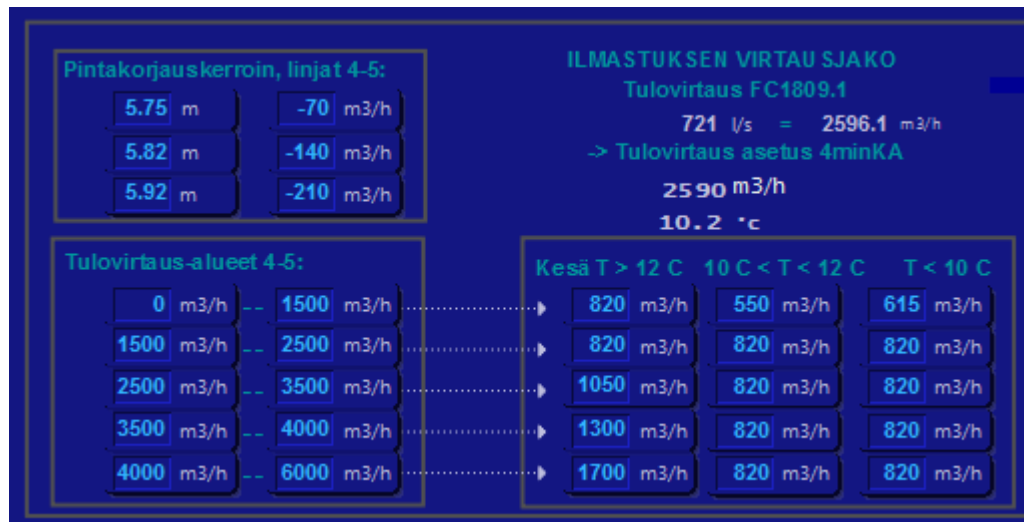
Ilmastusaltaissa voidaan pitää korkeampaa kiintoainepitoisuutta kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa. Taskilassa ilmastusaltaan kiintoainepitoisuus on noin 6 000 – 12 000 mg/l. Kesällä typenpoiston ollessa käynnissä, kun prosessilämpötila on yli 12 °C nostetaan kiintoainepitoisuus korkealle, noin 10 000 mg/l. Talvikaudella, kun prosessilämpötila laskee alle 12 °C, kiintoainepitoisuus ilmastusaltaissa pyritään pitämään matalalla, alle 7 000 mg/l, jotta kalvot eivät kuormittuisi liikaa kiintoaineen ja kylmän veden vuoksi. Kalvoaltaiden kiintoainepitoisuus ( $MLSS_{MBR}$ ) nousee suodatuksen ja kierrätyksen takia korkeammalle kuin ilmastusaltaiden kiintoainepitoisuus ( $MLSS_{ilm}$ ), mikä näkyy yhtälössä 6. Kalvoaltailta liete kiertää takaisin ilmastusaltaille kierrätyssuhteella  $R = 300 - 700 \%$ . Liete johdetaan kalvoaltailta ylivuotona kanavaan, jossa se yhdistyy MBR-yksikköön tulevaan jäteveteen ennen ilmastusaltaiden ensimmäistä lohkoa.

$$MLSS_{MBR} = \left( \frac{R + 1}{R} \right) \cdot MLSS_{ilm} \quad (6)$$

missä  $MLSS_{MBR}$  on kalvoaltaan kiintoainepitoisuus [mg/l],  
 $R$  on kierrätysuhde (300 – 700 %) ja  
 $MLSS_{ilm}$  on ilmastusaltaiden kiintoainepitoisuus [mg/l].

### 7.2.1 Tuleva vesi

Ilmastusaltaille 4 ja 5 tulevan jäteveden virtaamaa säädetään vakiovirtaamasäädöllä niin kutsutuilla virtaamaportailla, jotka perustuvat koko laitokselle tulevaan virtaamaan. MBR-yksikköön pyritään johtamaan tasaista virtaamaa suhteutettuna käytössä olevien linjojen lukumäärään, jotta kalvosuodatus toimii tasaisesti. Siten jokaiselle laitokselle tulevan veden virtaamaportaalille on asetettu erikseen virtausasetukset (kuva 19). Virtaamaportaissa on käytössä kolme lämpötila-aluetta, koska MBR-linjojen sallitut virtaamat ovat riippuvaisia veden lämpötilasta. Lisäksi tulovirtaamassa on käytössä pinnan rajoitussäätö pintakorjauskertoimella. Jos ilmastusaltaiden 4 ja 5 pinta nousee normaalitilannetta korkeammalle, ilmastukseen tulevan veden virtaussäätöä pudotetaan leikkurin avulla. Ilmastukseen tulevan veden virtaamaa säädetään säätöventtiilillä virtausmittauksen takaisinkytkennän perusteella.



Kuva 19. Taskilan MBR-yksikön virtaamaportaajat ja pintakorjauskertoimet

### 7.2.2 Ylijäämälietteen poisto

Ylijäämälietteen poisto tapahtuu ilmastusaltaiden 4 ja 5 ensimmäisistä lohkoista uppopumpuilla. Ylijäämälietepumput ovat taajuusmuuttajakäyttöisiä allaskohtaisia pumppuja, jotka pumppaavat ylijäämälietteen linjastoon, jonka kautta ylijäämäliete johdetaan laitoksen esikäsittelyyn esiselkeytykseen menevään kanavaan flokkauksen loppuosaan ja/tai hiekanerotukseen. Ylijäämälietepumput käyvät vuorotellen, molemmat kerran tunnissa. Pumput pumppaavat ylijäämälietettä haluttua lieteikää vastaavan asetetun määrän tai aikaohjauksessa asetetun ajan, eli ylijäämälietteen poistoon on valittavissa kaksi ajotapaa: lieteikäpoisto ja aikaohjaus. (Palmunen 2018)

Lieteikäpoistossa ohjausperusteena käytetään laskennallista lieteikää, jonka perusteella saadaan vuorokautinen poistettavan ylijäämälietteen määrä. Automaatiojärjestelmään asetetaan laskennallinen lieteikä, 3 – 30 d, jolloin järjestelmä laskee vuorokaudessa poistettavan ylijäämälietteen määrän linjakohtaisesti. Vuorokaudessa poistettava määrä jaetaan pumppausjaksoille, joka on molemmille linjoille puoli tuntia, jolloin molemmat ylijäämälietepumput käyvät kerran tunnissa. Kun tarvittava ylijäämälietteen määrä on saavutettu yksittäistä pumppausjaksoa kohden, pysäytetään pumppaus. Kun pumppausjakso on tullut täyteen, käynnistetään seuraavan linjan ylijäämälietteen pumppaus. Lieteiän laskenta on esitetty yhtälössä 7. Aikaohjauksessa molemmille ylijäämälietepumpuille asetetaan käyntiaika puolen tunnin pumppausjakson sisälle. (Palmunen 2018)

$$\theta_c = \frac{V}{Q_w} \quad (7)$$

missä  $\theta_c$  on lieteikä [d],  
 $V$  on allastilavuus (2 250 m<sup>3</sup>/linja) ja  
 $Q_w$  on ylijäämälietteen määrä [m<sup>3</sup>/d].

### 7.2.3 Pintalietteen poisto

Pintalietteen poisto ilmastusaltailta 4 ja 5 tapahtuu ryyperryuhien avulla. Lohkoissa 7 sijaitsevat ryyperryuheet keräävät pintalietettä ajosekvenssin aikataulun mukaan. Ryyperryuhista pintaliete johdetaan pintalietekaivoon, josta pintalietepumpuilla liete pumpataan kanavaan ennen flokkausta. Pintalietepumppuja ohjataan pintalietekaivon pinnan mukaan siten, että pintalietepumput käynnistyvät, kun kaivon pinta nousee

asetetulle käynnistysrajalle ja pumppaus lopetetaan, kun pinta laskee pysäytysrajalle. Ryyppyruihia ohjataan työ- ja taukoajojen mukaisesti. Taukoajan tullessa täyteen, ryyppyruihi käännetään ala-asentoon lietteenpoistoon. Kun pintalietteen poistoaika on kulunut, ryyppyruihi käännetään takaisin yläasentoon ja aloitetaan taukoajan laskenta. Molempien linjojen ryyppyruihia voidaan ohjata samanaikaisesti. Jos ilmastusaltaan pinta on alle ryyppyruihen toiminta-alueen silloin, kun ryyppyruihen tauko aika tulee täyteen, automaatiojärjestelmä estää ryyppyruihen kääntymisen ala-asentoon. Pintalietteen poisto voidaan tehdä seuraavan kerran vasta, kun ilmastusaltaan pinta nousee ryyppyruihen toiminta-alueelle. (Palmunen 2018)

#### **7.2.4 Veden johtaminen kalvoaltaille**

Jätevesi johdetaan kalvoaltaille kuilupumpuilla ilmastusaltaiden viimeisistä lohkoista. Molemmilla linjoilla 4 ja 5 on kolme kuilupumppua, niin kutsuttuja kierrätyslietepumppuja. Kierrätyslietepumpuilla jätevesi nostetaan välikanavaan, josta vesi johdetaan kalvoaltaisiin. Välikanavassa on sulkuluukku, jonka avulla voidaan tarvittaessa eristää kalvoaltaat 1 ja 2 kalvoaltaista 3 ja 4, jolloin ilmastuslinjalta 4 voidaan johtaa vettä kalvoaltaille 1 ja 2 sekä vastaavasti ilmastuslinjalta 5 kalvoaltaille 3 ja 4. Eristys voidaan tehdä esimerkiksi huollon ajaksi. Normaalitilanteessa välikanavan sulkuluukku on auki. Kalvoaltaissa on myös tulevan veden sulkuluukut, joita ohjataan MBR-linjojen tilan mukaan.

Kierrätyspumppausta ohjataan automaatiosta jatkuvasti, jotta kierrätys pysyy riittävänä suodatuksen nähden. Kierrätyslietepumpuista 1 – 3 pumppua on käynnissä molemmilla ilmastuslinjoilla, kun MBR-linjoja on suodatuskäytössä. Ilmastuslinjoilta pyritään pumppaamaan saman verran lietettä välikanavaan, jotta ilmastusaltaat pysyvät keskenään tasapainossa. Tällöin kierrätyslietepumpuille laskettu tuotto-ohje jaetaan molempien linjojen pumpuille. Kierrätyspumppausta voidaan säätää virtaamasuhdesäädöllä tai pumppujen tuottokäyriä käyttäen.

Virtaamasuhdesäädössä kierrätyslietepumppujen virtaamaa säädetään tulokanavan virtausmittauksen ja asetetun kierrätysuhteen perusteella. Tulokanavassa yhdistyy MBR-yksikköön tuleva jätevesi sekä MBR-linjoilta tuleva kierrätysliete. Virtaussyhdessä on kuitenkin käyttöönoton jälkeen jätetty toissijaiseksi säätötavaksi tulokanavan virtausmittauksen epäluotettavuuden vuoksi, sillä virtausmittauksen kohdalla virtaus on ajoittain epätasainen, turbulентtinen tai jakautunut epätasaisesti

kanavaan. Pääsääntöisesti kierrätyslietepumppujen virtaamaa säädetään pumppujen tuottokäyrien mukaan, jolloin virtaama-asetus lasketaan kierrätyssuhteen ( $R$ ), MBR-linjojen aktiivisen kapasiteetin ( $n$ ) eli suodatuksessa olevien MBR-linjojen lukumäärän sekä MBR-linjojen virtaama-asetuksen ( $q$ ) perusteella. Virtaama-asetuksen perusteella annetaan pumpuille tuotto-ohje niiden tuottokäyrältä. Kierrätyslietepumppujen virtaama-asetuksen laskenta on esitetty yhtälössä 8.

$$Q_{kierrätys} = R \cdot n \cdot q \quad (8)$$

missä  $Q_{kierrätys}$  on kierrätyslietepumppujen virtaama-asetus [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],  
 $R$  on kierrätyssuhde (300 – 700 %),  
 $n$  on aktiivinen kapasiteetti ja  
 $q$  on MBR-linjojen virtaama-asetus [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].

Tuottokäyrien mukaisessa kierrätyspumppauksen säädössä kierrätyspumppujen virtaama-asetus reagoi nopeasti MBR-linjojen tilojen muutoksiin, kun linjoja siirtyy suodatuksesta standby-tilaan tai pesuihin.

### 7.3 MBR-kalvosuodatus

MBR-kalvosuodatus toimii automaation ohjaamana suodatussekvenssillä. Suodatussekvenssissä MBR-linja voi olla seuraavissa tiloissa: suodatus, vastavirtahuuhtelu, relaksointi ja standby. Suodatustilassa linja on käytössä ja kalvojen läpi suodatetaan jätevettä. Vastavirtahuuhtelu ja relaksointi ovat toisilleen vaihtoehtoisia tiloja suodatuskertojen välissä. Vastavirtahuuhtelussa linjan permeaattipumpun suunta käännetään kalvoille päin ja permeaattia pumpataan kalvojen läpi kalvoaltaaseen, jolloin kalvoja huuhdotaan permeaatilla. Relaksointia voidaan käyttää korvaamaan vastavirtahuuhtelua. Relaksoinnin aikana permeaattipumppu pysäytetään ja kalvojen annetaan levätä vastavirtahuuhteluun varatun ajan verran. Standby-tilassa MBR-linja on lepotilassa, kun MBR-yksikön suodatuskapasiteetti on riittävä vähemmällä kuin neljällä linjalla. Standby-tilassa linja on valmiustilassa nousemaan takaisin suodatukseseen, jos tarvittava suodatuskapasiteetti nousee. Yhtäaikaisesti suodatuksessa toimii 2, 3 tai 4 MBR-linjaa plant demand –laskennan mukaan. PD-laskenta ohjaa kalvosuodatuslinjoja suodatuskäyttöön ja standby-tilaan ilmastusaltaan pinnan sekä suodatuskapasiteetin perusteella.

### 7.3.1 Suodatussykli

MBR-linjan suodatussykli muodostuu suodatusjaksosta, jonka jälkeen suoritetaan vastavirtahuuhtelu tai vaihtoehtoisesti relaxointi. Suodatussyklin pituus on muutettavissa, sillä suodatuksen ja vastavirtahuuhtelun/relaksoinnin kestoajat eivät ole vakioita, vaan niitä voidaan muuttaa käyttäjän toimesta. Suodatussyklin kokonaispituus muodostuu suodatusjaksosta, ilmanpoistosta, vastavirtahuuhtelusta tai relaxoinnista sekä venttiilien asennon muutoksiin kuluva ajasta. Taskilassa suodatussyklin kokonaispituutena on käytetty 12 minuuttia, jossa suodatusta tapahtuu noin 11 minuutin ajan. Suodatuksen jälkeen suoritetaan 15 sekuntia kestävä ilmanpoisto permeaattilinjasta ennen vastavirtahuuhtelua tai relaxointia, joiden kesto on 30 sekuntia. Ilmanpoisto tapahtuu permeaattilinjan ejektorilla ja sen tarkoituksena on poistaa mahdollisesti suodatuksen aikana syntyneet ilmakuplat permeaattilinjasta ennen vastavirtahuuhtelua. Vastavirtahuuhtelun tai relaxoinnin päätteeksi linja palaa takaisin suodatkseen ja suodatussykli alkaa alusta.

Jokaisella linjalla suodatussykli kulkee eri vaiheissa, sillä automaatio ei salli kahta linjaa yhtä aikaa vastavirtahuuhteluun. Automaatioon on rakennettu jokaiselle linjalle omat vuorot, joiden aikana vastavirtahuuhtelu voi tapahtua. Vastavirtahuuhtelu tapahtuu, kun linja saa oman vuoronsa ja vuoro siirtyy seuraavalle linjalle vasta, kun vuoron kesto on kulunut loppuun. Jos vuoron kestoksi asetetaan esimerkiksi 3 minuuttia, tällöin jokainen linja saa seuraavan vastavirtahuuhteluvuoron 12 minuutin välein, kun kaikki neljä linjaa saa 3 minuutin vuoron peräjälkeen. Näin muodostuu linjalle 12 minuutin suodatussykli.

Vastavirtahuuhtelussa permeaatin virtaama on 416 m<sup>3</sup>/h. Suodatussyklissä MBR-linja suorittaa joko vastavirtahuuhtelun tai relaxoinnin suodatusjakson jälkeen vastavirtahuuhtelu- ja relaxointiasetuksen kertalaskureiden mukaan. Molemmille toiminnoille on omat asetukset ja kertalaskurit. Jos relaxointiasetuksen arvoksi on asetettu 2 ja vastavirtahuuhteluasetuksen arvoksi 2, linja suorittaa kahden peräkkäisen suodatussyklin päätteeksi relaxoinnin ja kahden seuraavan peräkkäisen suodatussyklin päätteeksi vastavirtahuuhtelun. Jos relaxointiasetuksen arvoksi asetetaan 0, suorittaa linja aina suodatusjakson jälkeen vastavirtahuuhtelun, ja päinvastoin.



### 7.3.2 Plant demand –laskenta

Ilmastusaltaiden 4 ja 5 pintojen mukaan säädetään permeaattipumppausta pintasäätökäyrällä. Pintasäätökäyrältä saadaan MBR-yksikön permeaattipumppaukselle kokonaisvirtausasetus eli plant demand (PD), joka jaetaan käytössä olevien linjojen kesken. Normaalitilanteessa PD-laskennassa käytetään pinnanmittaustietona ilmastusaltaiden 4 ja 5 pintojen keskiarvoa. Vaihtoehtoisesti säätöön voidaan valita jommankumman ilmastusaltaan pintamittaustieto, jos esimerkiksi toisen ilmastuslinjan pinnanmittauksessa on häiriö, tai toinen ilmastusallas on pois käytöstä. (Palmunen 2018)

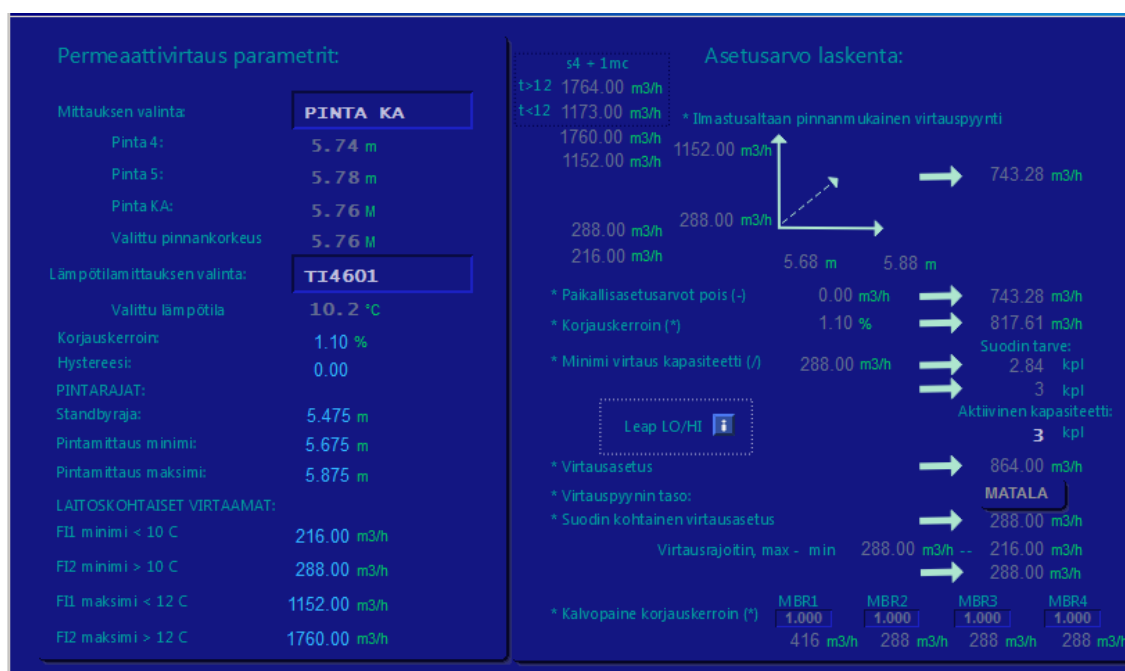
Kokonaisvirtaama-asetus perustuu ainoastaan ilmastusaltaan pinnankorkeuteen ja virtaaman säätöalue on pinnan minimi- ja maksimikorkeuksien väliin jäävä alue. (Hyxo Oy 2018a) Plant demand –laskennassa käytetään yhtälöä 9:

$$PD = FCL + \frac{FCH - FCL}{LCH - LCL} \cdot (pinta - LCL) \quad (9)$$

missä  $PD$  on kokonaisvirtaama-asetus [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],  
 $FCL$  on minimivirtaama ( $216 \text{ m}^3/\text{h}$  tai  $288 \text{ m}^3/\text{h}$ ),  
 $FCH$  on maksimivirtaama ( $1\,152 \text{ m}^3/\text{h}$  tai  $1\,760 \text{ m}^3/\text{h}$ ),  
 $LCH$  on ilmastusaltaan kokein sallittu pinta [ $\text{m}$ ],  
 $LCL$  on ilmastusaltaan matalin sallittu pinta [ $\text{m}$ ] ja  
 $pinta$  on ilmastusaltaan pinta [ $\text{m}$ ].

Käytössä olevien MBR-linjojen lukumäärä perustuu MBR-yksikön virtaustarpeeseen sekä yksittäisen linjan pienimpään sallittuun virtaukseen. Yhtälössä käytettävät minimi- ja maksimivirtaukset riippuvat veden lämpötilasta. Minimivirtaamana ( $FCL$ ) pidetään yksittäisen MBR-linjan pienintä sallittua virtausta. Kun veden lämpötila on  $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , on linjan pienin sallittu virtaus  $288 \text{ m}^3/\text{h}$ . Kun taas veden lämpötila on alle  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , on linjan pienin sallittu virtaus  $216 \text{ m}^3/\text{h}$ . Linjakohtaiset pienimmät sallitut virtaukset ovat myös linjojen keskivirtaamia. Maksimivirtaamassa ( $FCH$ ) on otettu huomioon kaikki neljä MBR-linjaa. Kun veden lämpötila on  $\geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ , on suurin sallittu virtaama yhteensä  $1\,760 \text{ m}^3/\text{h}$  eli  $440 \text{ m}^3/\text{h}$  per linja. Kun taas veden lämpötila on alle  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ , on suurin sallittu virtaama yhteensä  $1\,152 \text{ m}^3/\text{h}$  eli  $288 \text{ m}^3/\text{h}$  per linja.

Kuvassa 20 on esitetty plant demand –laskennan perusteella saatu tarvittavien MBR-linjojen lukumäärä (suodintarve) Taskilan automaatiojärjestelmässä. Kun MBR-yksikön virtaustarve kasvaa eli kun ilmastusaltaan pinta nousee, ohjataan MBR-linjoja standby-tilasta suodatuskäyttöön. Linjoja otetaan käyttöön yksi kerrallaan kokonaisvirtausasetuksen kasvaessa lämpötilan mukaisella minimivirtaamalla. Jos kaikkien neljän linjan kokonaisvirtaama ei riitä vastaamaan kokonaisvirtausasetusta, linjojen virtausasetusta kasvatetaan lineaarisesti minivirtausasetuksesta siten, että jokaiselle linjalle on sama virtaama-asetus. Vastaavasti, jos kokonaisvirtausasetus pienenee, ohjataan MBR-linjoja yksitellen standby-tilaan. Kun ilmastusaltaan pinta laskee standby-rajalle, kaikki neljä linjaa ohjataan standby-tilaan. Automaatiojärjestelmä pyrkii pitämään suodintarpeen ja aktiivisen kapasiteetin (suodatuksessa olevien linjojen lukumäärä) tasapainossa. Eli kun suodintarve kasvaa, siirretään standby-tilassa oleva linja suodatukseseen. Suodintarpeen kasvaessa yli neljän ja aktiivisen kapasiteetin ollessa neljä, ollaan tilanteessa, jolloin MBR-linjojen minimivirtaama ei riitä vastaamaan kokonaisvirtaama-asetusta ja linjojen virtaama-asetusta kasvatetaan.



Kuva 20. Plant demand -laskenta

### 7.3.3 Standby-tila

MBR-linja voidaan ohjata standby-tilaan, kun ilmastusaltaan pinta laskee ja plant demand –laskennan mukaan suodattimien tarve vähenee. Tällöin pisimpään suodatuksessa ollut

linja menee välittömästi standby-tilaan. Standby-tilaan mentäessä kalvoaltaan sulkuluukku suljetaan ja kalvoilmastus lopetetaan. Pitkäaikaisessa standby-tilassa toimii työ-/taukoaikojen mukaan ajastettu kalvoilmastus, kierrätys sekä ilmanpoisto. Ajastettu kalvoilmastus tapahtuu kahden tunnin välein viiden minuutin ajan. Kierrätys tehdään kahden tunnin välein avaamalla sulkuluukku kymmenen minuutin ajaksi, jolloin kalvoaltaaseen virtaa uutta lietettä ilmastusaltaista ja samalla kalvoaltaasta poistuu lietettä ylivuotona ilmastusaltaille menevään kanavaan. Ilmanpoisto suoritetaan neljän tunnin välein 20 sekunnin ajan.

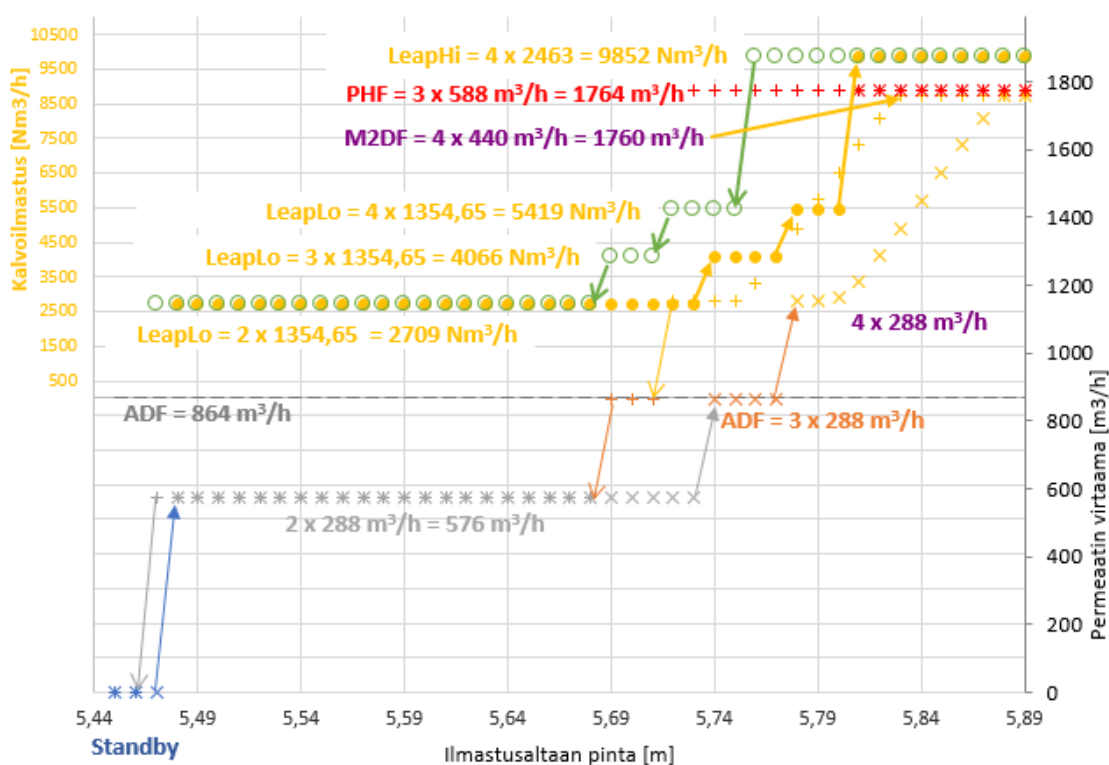
Kun PD-laskennan mukaan tarvitaan lisää MBR-linjoja suodatukseseen, saa pisimpään standby-tilassa ollut linja luvan nousta suodatukseseen, jolloin kalvoaltaan sulkuluukku ohjataan auki. Linja nousee suodatukseseen aina vastavirtahuuhtelun tai relaxsoinnin kautta. Ennen suodatussykliin palaamista, linja odottaa oman vastavirtahuuhteluvuoronsa ja suorittaa vastavirtahuuhtelun tai relaxsoinnin.

MBR-linjojen suodatusaikoja sekä standby-tilassa oloa pyritään pitämään tasapainossa. Tämän takia standby-tilaan ohjataan ensimmäisenä linja, joka on ollut kauiten suodatuksessa. Vastaavasti standby-tilasta suodatukseseen nousee linja, joka on ollut pisimpään standby-tilassa. Toimintatuntien tasausta ohjataan myös rajoittamalla linjojen aikaa standby-tilassa. Yksi linja saa olla standby-tilassa maksimissaan neljä tuntia yhtäjaksoisesti. Neljän tunnin standby-tilassa olon jälkeen linja nostetaan takaisin suodatukseseen ja suodatuksessa ollut linja ohjataan standby-tilaan, mikäli vähintään kaksi linjaa on suodatuskäytössä. Tämä toiminta-ajan taseus ei ole mahdollista silloin, kun kaikki neljä linjaa ovat standby-tilassa ilmastusaltaan matalan pinnan takia.

#### **7.3.4 Permeaattivirtaama**

Veden lämpötila vaikuttaa kalvojen läpäisykykyyn eli permeabiliteettiin, joten suodatuksen prosessiohjauksessa on käytössä kolme lämpötila-aluetta, jotka vaikuttavat permeaattivirtaamaan. Kesäkaudella veden lämpötila on  $\geq 12\text{ °C}$ , välikaudella  $10\text{ °C} \leq T < 12\text{ °C}$ , ja talvikaudella  $< 10\text{ °C}$ . Prosessiohjaukseen käytetään lämpötilamittausta permeaattialtaasta, jonka mukaan ohjausjärjestelmä ohjaa permeaattivirtaaman automaattisesti oikealle lämpötila-alueelle. Kuvissa 21, 22 ja 23 on esitettyinä permeaattivirtaama ilmastusaltaan pinnan funktiona eri lämpötila-alueilla.

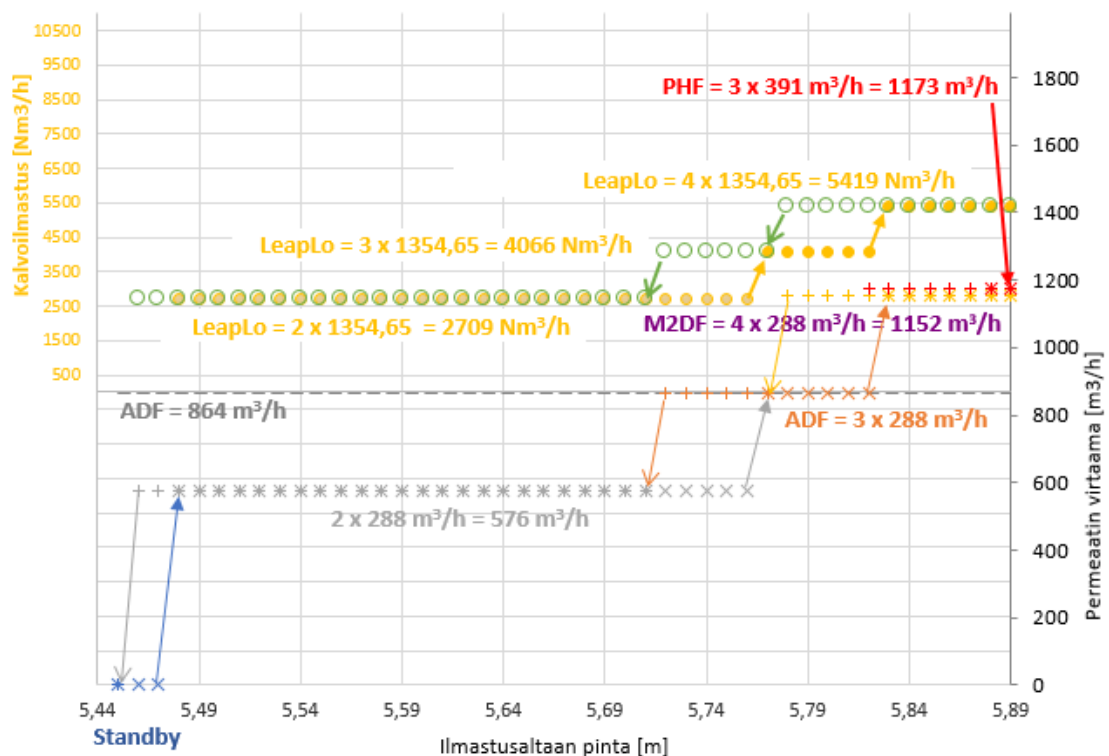
Taskilan MBR-yksikön keskivirtaama (ADF, *average daily flow*) on  $864 \text{ m}^3/\text{h}$  riippumatta veden lämpötilasta. Normaalitilanteessa ilmastusaltaan pintaa pyritään pitämään tasaisena sillä alueella, jossa MBR-yksikkö toimii keskivirtaamalla. Jos ilmastusaltaan pinta nousee, nostetaan MBR-yksikön permeaattivirtaamaa lineaarisesti maksimissaan maksimikapasiteettiin asti. Maksimikapasiteetin (M2DF, *maximum two daily flow*) käyttö on rajoitettu kahteen vuorokauteen, jonka jälkeen permeaattivirtaama rajoitetaan yhden vuorokauden ajaksi takaisin keskivirtaamaan. Jos yhdelle linjalle suoritetaan viikoittaista ylläpitopesua, voidaan tarvittaessa kolmen muun linjan permeaattivirtaamaa nostaa hetkelliseen maksimikapasiteettiin (PHF, *peak hourly flow*). Tällöin ylläpitopesussa olevan linjan permeaattivirtaama jaetaan kolmen muun linjan kesken, jotta tarvittava kapasiteetti voidaan saavuttaa. Hetkellisen maksimikapasiteetin käyttö on rajoitettu yhteen tuntiin, jonka jälkeen permeaattivirtaama rajoitetaan takaisin keskivirtaamaan, vaikka ylläpitopesu olisi yhdellä linjalla edelleen käynnissä.



Kuva 21. Kesäkauden virtaamakuvaaja, kun veden lämpötila on  $\geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$

Veden lämpötilan ollessa  $\geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$ , on käytössä kesäkauden asetukset permeaattivirtaamalle. Kesäkaudella MBR-yksikön linjakohtainen keskivirtaama-asetus on  $288 \text{ m}^3/\text{h}$ , mikä on myös MBR-linjan pienin sallittu virtaama. Kun ilmastusaltaan pinta nousee standby-ajan yläpuolelle ( $5,475 \text{ m}$ ), otetaan kaksi MBR-linjaa käyttöön

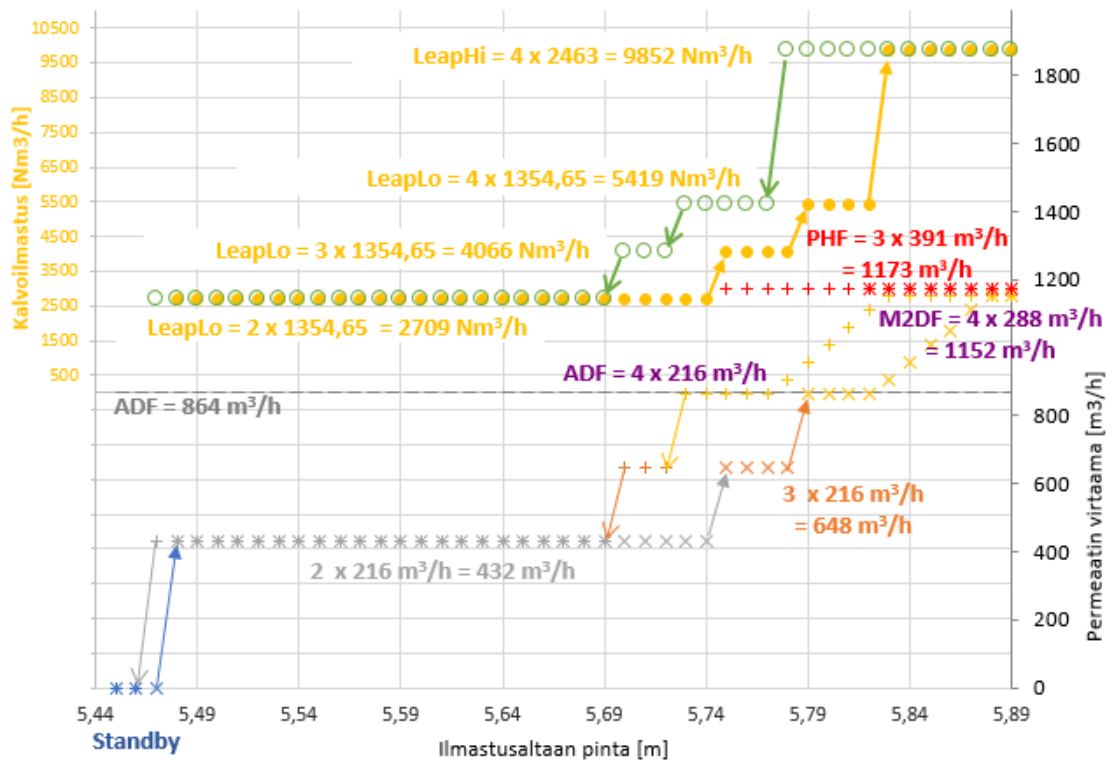
keskivirtaamalla  $288 \text{ m}^3/\text{h}$ . MBR-yksikön keskivirtaama ADF saavutetaan, kun kolme linjaa on suodatuskäytössä keskivirtaamalla ( $3 \times 288 \text{ m}^3/\text{h} = 864 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Jos ilmastusaltaan pinta nousee edelleen, otetaan neljäs linja käyttöön keskivirtaamalla. Tämän jälkeen linjojen permeaattivirtaamaa voidaan kasvattaa keskivirtaamasta lineaarisesti kohti maksimivirtaamaa. Kesäkaudella MBR-yksikön maksimivirtaama M2DF on  $1\,760 \text{ m}^3/\text{h}$ , jolloin kaikki neljä linjaa suodattavat virtaamalla  $440 \text{ m}^3/\text{h}$ . Kun maksimivirtaama saavutetaan, käynnistyy ohjausjärjestelmässä laskuri, joka laskee yhtäjaksoista suodatusta maksimivirtaamalla. Jos MBR-yksikkö suodattaa maksimivirtaamalla kaksi vuorokautta yhtäjaksoisesti, rajoitetaan tämän jälkeen permeaattivirtaamaa yhden vuorokauden ajaksi keskivirtaamalle,  $3 \times 288 \text{ m}^3/\text{h}$ . Vuorokauden rajoituksen jälkeen ohjausjärjestelmä sallii taas tarvittaessa permeaatin maksimivirtaaman. Maksimivirtaaman rajoitusta ei oteta käyttöön, jos MBR-yksikkö ei suodata yhtäjaksoisesti kahden vuorokauden ajan maksimivirtaamalla. Kesäkauden hetkellinen maksimivirtaama PHF on  $1\,764 \text{ m}^3/\text{h}$ , jolloin kolme linjaa suodattavat virtaamalla  $588 \text{ m}^3/\text{h}$  yhden linjan ollessa ylläpitopesussa.



Kuva 22. Välikauden virtaamakuvaaja, kun veden lämpötila on  $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Välikaudella, kun veden lämpötila on  $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , linjakohtainen keskivirtaama-asetus on  $288 \text{ m}^3/\text{h}$ , kuten kesäkaudellakin. Standby-ajan yläpuolella otetaan ensin

käyttöön kaksi linjaa keskivirtaamalla. Tämän jälkeen kolmen linjan ollessa käytössä keskivirtaamalla saavutetaan MBR-yksikön keskivirtaama ADF,  $3 \times 288 \text{ m}^3/\text{h} = 864 \text{ m}^3/\text{h}$ . Välikauden maksimivirtaamat M2DF sekä PHF ovat pienempiä kuin kesäkaudella alemman lämpötilan vuoksi. Välikaudella maksimivirtaama M2DF on  $1\,152 \text{ m}^3/\text{h}$ , jolloin kaikki neljä linjaa suodattavat keskivirtaamalla  $288 \text{ m}^3/\text{h}$ . Kaikkien linjojen ollessa suodatuksessa, permeaattivirtaaman ei anneta nousta yli  $288 \text{ m}^3/\text{h}$ , jotta kalvot eivät kuormittuisi liikaa, sillä lämpötilan laskiessa kalvojen permeabiliteetti on laskenut. Välikauden hetkellinen maksimivirtaama PHF on  $1\,173 \text{ m}^3/\text{h}$ , jolloin kolmen linjan permeaattivirtaaman sallitaan nousta yhden tunnin ajaksi  $391 \text{ m}^3/\text{h}$  asti, neljännen linjan ollessa ylläpitopesussa.



Kuva 23. Talvikauden virtaamakuvaaja, kun veden lämpötila on  $< 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Talvikaudella veden lämpötilan ollessa alle  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , linjakohtainen keskivirtaama-asetus on pienempi kuin väli- ja kesäkaudella,  $216 \text{ m}^3/\text{h}$ . Standby-ajan yläpuolella otetaan kaksi linjaa käyttöön keskivirtaamalla ja ilmastusaltan pinnan edelleen noustessa tarvittaessa kolmas ja neljäs linja. Tämän jälkeen MBR-yksikön keskivirtaama  $864 \text{ m}^3/\text{h}$  saavutetaan, kun kaikki neljä linjaa ovat suodatuksessa keskivirtaamalla,  $4 \times 216 \text{ m}^3/\text{h} = 864 \text{ m}^3/\text{h}$ . Talvikaudella maksimivirtaamat ovat vastaavia kuin välikaudella. Kahden vuorokauden ajan sallitaan maksimivirtaama M2DF, jolloin kaikki linjat suodattavat virtaamalla

288 m<sup>3</sup>/h eli permeaattivirtaama on yhteensä 1 152 m<sup>3</sup>/h. Yhden linjan ollessa ylläpitopesussa, sallitaan kolmen muun linjan virtaaman nousta 391 m<sup>3</sup>/h asti, jolloin permeaatin virtaama on yhteensä 1 173 m<sup>3</sup>/h.

Kuvista 21, 22 ja 23 nähdään, että ilmastusaltaan pinnan sallitaan vaihdella suurellakin alueella. Kuitenkin pinnan korkeutta pyritään pitämään tasaisena ohjaamalla MBR-yksikköön sisään tulevaa virtausta, jotta turhia MBR-linjojen tilanvaihtoja ei esiintyisi standby-tilan ja suodatuksen välillä. Ilmastusaltaan pinta pyritään pitämään alueella, jolloin MBR-yksikkö suodattaisi keskivirtaamalla 864 m<sup>3</sup>/h: kesä- ja välikaudella kolmella linjalla 288 m<sup>3</sup>/h, ja talvikaudella neljällä linjalla 216 m<sup>3</sup>/h.

### 7.3.5 Mittaukset ja toimilaitteet

MBR-kalvoaltaisiin, permeaattialtaaseen sekä ilma- ja permeaattilinjoihin asennetut mittaukset ja venttiilit toimivat ohjausjärjestelmässä toiminnan monitoroinnissa, permeaatin laadun tarkkailussa sekä kalvojen suojelemisessa. Kalvoaltailla on ilmastusaltaalta tulevan veden sulkuluukut, pinnan mittaukset ja kiintoainemittaukset. Ilmalinjoissa on kalvoilmastuksen sulkuventtiilit sekä ilmamäärämittaukset. Lisäksi ilman runkolinjaan on asennettu ilmamäärämittaus. Permeaattilinjoiissa on permeaattipumput, permeaattiventtiilit, ilmanpoistoejektorit, virtausmittaukset sekä painemittaukset permeaattipumpun molemmilla puolilla. Lisäksi permeaattilinjoihin on asennettu pesukemikaalien natriumhypokloriitin ja sitruunahapon annostelulinjojen sulkuventtiilit kalvoaltaan ja permeaattipumpun välille. Näiden lisäksi permeaattilinjoiissa on sameusmittaukset ja sameuden näytteenottolinjojen sulkuventtiilit. (Palmunen 2018) Permeaatin laadun tarkkailemiseksi permeaattialtaassa on online-mittaukset lämpötilalle, kiintoaineelle, pH:lle, ammoniumtypelle (NH<sub>4</sub>-N), nitraattitypelle (NO<sub>3</sub>-N), liukoiselle fosfaatille sekä kokonaisfosforille.

Erityisesti paineen ja ilmamäärän mittaukset toimivat kalvoja suojelevina mittauksina. Paineen tai ilmamäärän noustessa yli lukitusrajojen, automaatio sulkee kyseisen linjan, sillä liian korkea paine tai kalvoilmastus ovat haitallisia kalvoille. Sameusmittaukset toimivat myös lukituksina linjoille. Pitkä kestoinen korkea sameus kertoo permeaatin laadun heikkenemisestä ja siten häiriöstä suodatuksen toiminnassa tai jopa kalvojen rikkoontumisesta. Sameudelle on asetettu hälytysrajan lisäksi kaksi lukitusrajaa, joista toinen lukitsee linjan ja toinen estää vastavirtahuuhtelun linjoilla, jotta mahdollisesti heikkolaatuinen permeaatti ei pääse tukkimaan kalvoja kuitujen sisäpuolelta. Kaikki

mittaukset toimivat online-mittauksina, jolloin suodatuksen toiminnasta ja permeaatin laadusta saadaan ohjausjärjestelmästä välittömästi tietoa.

## 7.4 Kalvoilmastus

Kalvoilmastus on päällä aina suodatussyklin aikana, ajoittain standby-tilassa sekä sekvenssiaskelien mukaan ajoittain ylläpito- ja liuotuspesuissa. MBR-altaiden kalvoilmastus tuotetaan kolmella taajuusmuuttajakäyttöisellä MBR-ilmastusilmakompressorilla. Kompressoreilta ilma johdetaan runkolinjaan, josta ilma jakaantuu käytössä olevien MBR-linjojen ilmalinjoille. Ilmalinjoilta ilma johdetaan pystyputkea pitkin kasettien alle, josta ilma leviää tasaisesti kalvoille. (Palmunen 2018)

Taskilassa käytössä olevissa Suez Water Technologies & Solutions –kalvovalmistajan MBR-kaseteissa on uusi ZeeWeed ilmastusmenetelmä LEAPmbr Aeration Technology (LEAPmbr AT). Kyseisessä ilmastusmenetelmässä kasettien alaosassa on asennettuna useita ilmastusyksiköitä, joihin johdettu ilma hajoaa suuriksi ilmakupliksi kalvomodulien väleihin. Kuvassa 24 on kuvattuna kasetti sen alaosasta, missä näkyy LEAPmbr AT –ilmastusmenetelmän rakenne. Ilma johdetaan kasetin alle keskellä olevaan vaakatasossa olevaan ilmaputkeen (kuvassa keskellä). Ilmaputkesta ilma johdetaan ilmastusyksiköihin, joista ilma jakaantuu tasaisesti koko kasetin alueelle. (Hyxo Oy 2018a)



Kuva 24. Kasetin alaosassa oleva LEAPmbr AT –ilmastusmenetelmä



Kalvoilmastus on yksi avaintekijöistä ZeeWeed 500D –kalvojen suorituskyvyn säilymisessä. Kalvoilmastuksen päätehtävänä on irrottaa kalvojen pinnalle kertynyttä kiintoainesta heiluttamalla kalvoja. Kasettien alla muodostuneet suuret kuplat muodostavat pyörreliikkeen noustessaan ylöspäin, mikä saa kuidut heilumaan ja liikkumaan kevyesti toisiaan vasten, jolloin kalvojen pinnalle kiinnittynyttä kiintoainetta irtaa. (Hyxo Oy 2018a) Kalvoilmastus vaikuttaa osaltaan myös kalvoaltaan lietteeseen. Kalvoilmastus estää lietteen laskeutumista ja tasoittaa lietettä kalvoaltaassa. (Bodai 2018)

Kalvoilmastuksessa on käytössä kaksi ilmastuksen tarpeen tasoa: matala ilmastuksen tarve LeapLo sekä korkea ilmastuksen tarve LeapHi. Taulukossa 9 on esitetty LeapLo ja LeapHi ilmamäärät käytössä olevien linjojen lukumäärän mukaan. LeapHi ilmamäärät ovat liki kaksinkertaisia LeapLo ilmamääriin verrattuna. Käytössä olevien linjojen lukumäärän mukaan MBR-ilmastusilmakompressoreille annetaan asetusarvo joko LeapLo tai LeapHi ilmastuksen tarpeeseen. Normaalitilanteessa 1 – 2 kompressoria on käytössä ja kolmas kompressori on lepotilassa varalla. LeapLo –tilassa neljän linjan ilman tarve voidaan tuottaa yhdellä kompressorilla. LeapHi –tilassa kolmelle ja neljälle linjalle tarvitaan kaksi kompressoria tarvittavan ilmamäärän tuottamiseen.

Taulukko 9. LeapLo ja LeapHi ilmamäärät

Käytössä olevat linjat	LeapLo [Nm <sup>3</sup> /h]	LeapHi [Nm <sup>3</sup> /h]
2 linjaa	2 709 (1 354,65 per linja)	4 926 (2 463 per linja)
3 linjaa	4 066	7 392
4 linjaa	5 419	9 852

LeapLo –tila on täysin riittävä kalvoilmastuksen taso irrottamaan kalvojen pinnasta kiintoainetta, tasoittamaan lietettä sekä estämään lietteen laskeutumista. Pääsääntöisesti pyritäänkin käyttämään LeapLo –tilaa. Kuitenkin LeapHi –tila ohjataan automaatiosta päälle seuraavien tekijöiden vaikutuksesta:

1. linjakohtainen permeaattivirtaama yli keskivirtaaman (kesä- ja talvikausina)
2. ajastettu LeapHi
3. kalvoaltaan kiintoainepitoisuus yli 12 500 mg/l
4. kokonaisvastuksen laskenta (kakun vastustus)

Kun MBR-linjat suodattavat keskivirtaamilla 216 m<sup>3</sup>/h talvikaudella tai 288 m<sup>3</sup>/h kesä- ja välikaudella, normaalitilanteessa on kalvoilmastuksen tarpeena LeapLo. Virtaamakuvaajat on esitetty edellä kuvissa 21, 22 ja 23. Kuvaajien vasemmassa yläreunassa on esitettyä myös kalvoilmastuksen määrät. Kesä- ja talvikausina, kun linjojen permeaattivirtaamaa nostetaan keskivirtaaman tasosta kohti maksimivirtaamaa, käynnistyy LeapHi –ilmastus. Korkeammalla virtaamalla kalvot kuormittuvat normaalia enemmän, ja lisäksi kiintoainetta voi alkaa kertyä kalvojen pinnalle runsaammin. Korkeammalla kalvoilmastuksen tasolla pyritään irrottamaan kiintoainetta kalvojen pinnalta tehokkaammin ja siten pienentämään kalvojen kuormitusta.

LeapLo –tilan ollessa päällä käy ajastin, jonka mukaan 12 tunnin yhtäjaksoisen LeapLo –tilan jälkeen käynnistyy LeapHi –tila 15 minuutin ajaksi. Tämä ajastettu LeapHi –ilmastus käynnistyy vain, jos matala ilmastuksen tarve on ollut yhtäjaksoisesti 12 tuntia. Ajastetun LeapHi –tilan tarkoituksena on varmistaa kiintoaineen irrotus kalvojen pinnalta ja sekoittaa kalvoaltaiden liete tehokkaammin.

Kalvoaltaiden maksimikiintoainepitoisuutena pidetään 12 500 mg/l. Jos tämä kiintoainepitoisuus ylitetään, käynnistyy LeapHi –ilmastus. Tällä pyritään ennalta ehkäisemään korkean kiintoainepitoisuuden aiheuttamat ongelmat, kuten kiintoaineen kertyminen altaisiin tai kalvojen pinnalle. LeapHi –tilaan siirtymiseen vaikuttaa myös ohjausjärjestelmän taustalla tehtävä kokonaisvastuksen ja siihen liittyvä kakun vastustuksen laskenta. Kakun vastustuksella tarkoitetaan kiintoaineen tai muun lian aiheuttamaa vastustusta suodatuksen aikana. Jos kakun vastusarvot nousevat yli asetettujen raja-arvojen edes yhdellä linjalla, käynnistyy LeapHi –tila. LeapLo –tila sallitaan vasta sen jälkeen, kun jokaisella linjalla kakun vastusarvot ovat alle raja-arvojen.

## 7.5 Tärkeimmät tunnusluvut

Kalvojen tukkeutumista ja suodatuksen toimintaa seurataan neljän laskennallisen muuttujan avulla: vuo, kalvopaine-ero (TMP), permeabiliteetti ja kalvojen kokonaisvastus eli kakun vastustus. Näistä laskennallisista muuttujista vuota käytetään prosessiohjauksessa vastavirtahuuhtelun virtaamalle, TMP:tä käytetään tarvittaessa permeaattivirtaaman ohjauksessa, ja kokonaisvastuksen laskentaa käytetään kalvoilmastuksen tason valinnassa.

### 7.5.1 Vuo (J)

Suodatuksen vuo (*flux*, J) kuvaa membraanin kuormitusta ja se lasketaan permeaattivirtaaman (q) sekä kalvojen pinta-alan (A) perusteella yhtälön 10 mukaan.

$$J = \frac{q}{A} \quad (10)$$

missä J on vuo [lmh eli l/m<sup>2</sup>/h],  
 q on permeaattivirtaama [l/h] ja  
 A on linjakohtainen kalvojen pinta-ala [12 200 m<sup>2</sup>].

Edellä olevalla laskukaavalla talviajan vuon arvoksi saadaan 17,7 lmh, kun linjakohtainen keskivirtaama on 216 m<sup>3</sup>/h. Kesä- ja välikautena vuon arvoksi saadaan 23,6 lmh, kun linjakohtainen keskivirtaama on 288 m<sup>3</sup>/h. Vuota lasketaan suodatuksen aikana ja suodatuksen aikaisia arvoja käytetään vastavirtahuuhtelun virtaaman ohjauksessa, missä vuon raja-asetuksena pidetään arvoa 34 lmh. Jos suodatuksen aikana linjan vuon arvo on alle 34 lmh, käytetään vastavirtahuuhtelun virtaama-asetuksena 416 m<sup>3</sup>/h, mikä on normaalitilanteessa vastavirtahuuhtelun virtaama. Jos taas suodatuksen aikaiset vuon arvot ylittävät 34 lmh, käytetään vastavirtahuuhtelun virtaama-asetuksena edellisen suodatusjakson korkeinta virtaamaa. Käytännössä vuon arvot voivat ylittää 34 lmh vain kesäkaudella, kun linjat ovat käytössä yli 416 m<sup>3</sup>/h virtaamalla. (Palmunen 2018)

### 7.5.2 Kalvopaine (TMP)

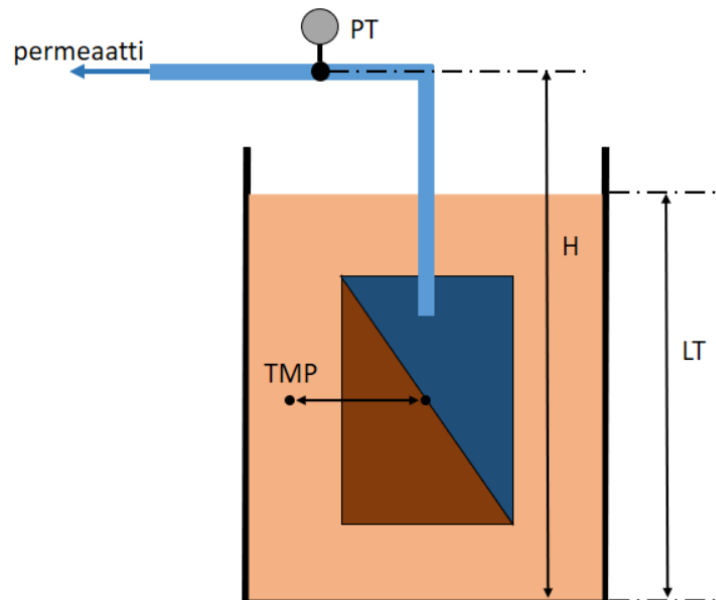
Kalvopaine eli TMP (*transmembrane pressure*) tarkoittaa kalvon eri puolilla olevien paineiden erotusta. Suodatuksen aikana permeaattipumppu imee vettä kalvojen läpi, jolloin paine kalvojen sisäpuolella on pienempi kuin kalvojen ulkopuolella. Tällöin

suodatuksen aikana TMP:n arvo on negatiivinen. Vastaavasti vastavirtahuuhtelun aikana permeaattipumppu työntää vettä kuitujen sisäpuolelta kalvojen läpi, jolloin kalvojen sisällä paine on suurempi kuin kalvojen ulkopuolella. Vastavirtahuuhtelun aikana TMP:n arvo on siis positiivinen. TMP on laskennallinen arvo, jonka laskennassa käytetään yhtälöä 11. (Hyxo Oy 2018a)

$$TMP = PT + (H - LT) \cdot C \quad (11)$$

missä  $TMP$  on kalvopaine [mbar],  
 $PT$  on MBR-linjan painelähtetimestä mitattu paine [mbar],  
 $H$  on painelähtetimen etäisyys pinnanmittauksen lähtetimen 0-pisteestä [m],  
 $LT$  on kalvoaltaan pinnan korkeus [m] ja  
 $C$  on muuntokerroin [mbar/m].

TMP:n laskennassa käytetyt arvot on merkitty myös kuvaan 25. Käyttöönottovaiheessa painelähtetimen etäisyys pinnanmittauksen lähtetimen 0-pisteestä ( $H$ ) mitattiin käsin ja syötettiin automaatiojärjestelmän laskentaan. Tämän jälkeen syötettyä arvoa hienosäädettiin ja muokattiin siten, että TMP:n arvoksi kalvojen lepotilassa saatiin 0 mbar.



Kuva 25. Kalvopaine-eron laskenta (mukaillen Hyxo Oy 2018a)

TMP-arvo on välillä -550 – 550 mbar, missä -550 mbar ja 550 mbar ovat TMP:n maksimiarvoja ja samalla lukitusrajoja. Normaali tilanteessa suodatuksen ja

vastavirtahuuhtelun aikana TMP-arvo on välillä noin -200 – 200 mbar. Kohonneet absoluuttiset TMP:n arvot toimivat prosessiohjauksena ylimääräiselle ilmanpoistolle sekä rajoituksena permeaattivirtaamalle.

Jos suodatuksen aikana TMP käy alle -250 mbar, suoritetaan seuraavan suodatuskerran aikana ylimääräinen 30 sekuntia kestävä ilmanpoisto. Ylimääräinen ilmanpoisto suoritetaan, jotta mahdollisesti korkeamman absoluuttisen TMP:n aiheuttava ilma permeaattilinjasta saadaan poistettua. Jos TMP:n arvo saavuttaa suodatuksen aikana -400 mbar, ohjausjärjestelmä siirtää permeaattipumpun TMP-säädölle. Tällöin permeaattipumpun suodatuksessa käyttämää virtausasetusta pudotetaan korjauskertoimen mukaan. (Palmunen 2018)

### 7.5.3 Permeabiliteetti (MK)

Permeabiliteetti (MK) kuvaa kalvon läpäisykykyä ja se voidaan laskea vuon (J) sekä TMP-arvon avulla yhtälöllä 12. Permeabiliteetin arvo lasketaan suodatuksen aikana aina 10 sekunnin välein.

$$MK = \frac{J}{TMP} \quad (12)$$

missä  $MK$  on permeabiliteetti [lmh/bar],  
 $J$  on vuo [lmh] ja  
 $TMP$  on kalvopaine [bar].

Koska kalvojen läpäisykyky on riippuvainen lämpötilasta, lasketaan ohjausjärjestelmässä lämpötilakorjattu permeabiliteetti, jossa lämpötilan vaikutuksen eliminoimiseksi veden viskositeettiin on permeabiliteetti normalisoitu 20 °C:een standardilämpötilaan. Lämpötilakorjaus mahdollistaa, että permeabiliteetin arvoja voidaan vertailla eri lämpötiloissa. Lämpötilakorjattua permeabiliteettia MKT käytetään suodatuksen toiminnan analysoinnissa. Lämpötilakorjattu permeabiliteetti lasketaan yhtälöllä 13.

$$MKT = MK \cdot \theta^{(20^{\circ}\text{C}-T)} \quad (13)$$

missä  $MK$  on vuon ja TMP:n avulla laskettu permeabiliteetti [lmh/bar],  
 $T$  on permeaatin lämpötila [°C] ja  
 $\theta$  on korjauskerroinvakio, jonka arvo riippuu permeaatin lämpötilasta.

Jos mitatun permeaatin lämpötila on  $< 20\text{ °C}$ , niin korjauskerroinvakion  $\theta$  arvo on 1,033.  
 Jos mitatun permeaatin lämpötila on  $> 20\text{ °C}$ , niin korjauskerroinvakion  $\theta$  arvo on 1,025.  
 (Palmunen 2018)

#### 7.5.4 Kokonaisvastus ( $R_T$ )

Kokonaisvastus ( $R_T$ ) lasketaan suodatuksen aikana yhtälön 14 mukaan. Mittausarvojen otto aloitetaan 120 sekuntia suodatussyklin aloituksesta, jonka jälkeen kokonaisvastuksen arvoja lasketaan 10 sekunnin välein. Mittausarvojen otto lopetetaan 30 sekuntia ennen suodatuksen päättymistä. Tällöin yhden suodatusjakson päätyttyä kokonaisvastukselle on noin 60 kappaletta mittaustuloksia, joiden perusteella voidaan luoda suodatusjaksoa ennustava kuvaaja pienimmän neliösumman menetelmällä.

$$R_T = 1 / MKT / \nu \quad (14)$$

missä  $R_T$  on kokonaisvastus [ $1/m$ ],  
 $MKT$  on lämpötilakorjattu permeabiliteetti [ $m^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$ ] ja  
 $\nu$  on veden viskositeetti [ $1,002 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$ ].

Kun suodatusjakson jälkeen on muodostettu suodatusjaksoa kuvaava kuvaaja ja yhtälö, voidaan alkutilanteen vastusarvo  $R_i$  (*initial resistance*) laskea kokonaisvastuksen  $R_T$  – datan perusteella lineaarisen interpolaation avulla ajanhetkellä 0 s, kun mittausarvojen otto on aloitettu. Lisäksi  $R_T$  –datajoukosta määritetään kakun vastusarvo  $R_c$  (*cake resistance*) lineaarisen regression avulla yhtälöstä 15. (Palmunen 2018)

$$R_c = R_T \text{suodatusjakson lopussa} - R_T \text{suodatusjakson alussa} \quad (15)$$

Kokonaisvastuksen sekä alkutilanteen ja kakun vastusarvojen laskenta suoritetaan automaatiojärjestelmän taustalla infojärjestelmässä. Laskennasta saatuja alkutilanteen ja kakun vastusarvoja verrataan asetusarvoihin, ja vertailun perusteella automaatiojärjestelmä ohjaa kalvoilmastuksen tasoa LeapLo ja LeapHi –tilojen välillä.

Jos laitoksella on päällä LeapLo –ilmastus ja sen halutaan jatkuvan, tulee lasketun alkuvastusarvon  $R_{i\_der}$  olla pienempi kuin alkuvastukselle asetettu kestävä asetusarvo  $R_{i\_sus}$ . Lisäksi lasketun kakun vastusarvon  $R_{c\_der}$  tulee olla pienempi kuin kakun vastukselle asetettu kestävä asetusarvo  $R_{c\_sus}$ , jotta automaatio sallii LeapLo –tilan

jatkumisen. Kyseinen vertailu tehdään jokaiselle MBR-linjalle erikseen. Kaikkien linjojen tulee sallia LeapLo –ilmastus, jotta laitoksella voidaan vastuslaskentojen puolesta jatkaa LeapLo –ilmastuksen käyttöä. Jos yhden tai useamman MBR-linjan vastusarvojen vertailussa  $R_{i\_der}$  tai  $R_{c\_der}$  tai molemmat näistä ovat yli vastaavan kestävän asetusarvon, laitoksella siirrytään LeapHi –ilmastukseen. (Haimi 2018)

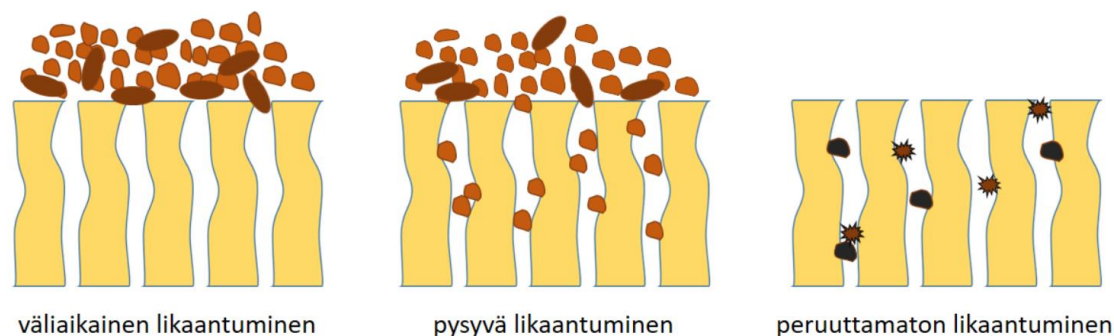
Vastaavasti, jos laitoksella on päällä LeapHi –ilmastus ja halutaan siirtyä LeapLo –tilaan, tulee lasketun alkuvastusarvon  $R_{i\_der}$  olla pienempi kuin alkuvastukselle asetettu optimoitu asetusarvo  $R_{i\_opt}$ . Lisäksi lasketun kakun vastusarvon  $R_{c\_der}$  tulee olla pienempi kuin kakun vastukselle asetettu optimoitu asetusarvo  $R_{c\_opt}$ , jotta automaatio sallii siirtymisen LeapLo –ilmastukseen. Vastaava vertailu tehdään jokaiselle MBR-linjalle erikseen ja kaikkien linjojen tulee sallia LeapLo –ilmastus, jotta laitoksella voidaan siirtyä LeapHi –ilmastuksesta LeapLo –ilmastukselle. Jos yhden tai useamman MBR-linjan vastusarvojen vertailussa  $R_{i\_der}$  tai  $R_{c\_der}$  tai molemmat näistä ovat yli vastaavan optimoidun asetusarvon, laitoksella jatketaan LeapHi –ilmastusta. (Haimi 2018)

Laskettujen vastusarvojen vertailu tehdään jokaisen suodatussyklin päätyttyä, jonka jälkeen aloitetaan uusi mittausarvojen otto. Kokonaisvastuksen laskentaa tehdään vain suodatuksen aikana, ja linjan mennessä standby-tilaan, ylläpitopesuun, liuotuspesuun tai kiinni, laskenta jäädytetään ja kyseisen linjan puolesta sallittaisiin LeapLo –ilmastus.

## 7.6 Kalvojen likaantuminen ja puhtaanapito

Kalvojen likaantumisella tarkoitetaan kiintoaineen tai muun lian kerääntymistä kalvojen pinnalle tai huokosiin, mikä pienentää kalvojen suodatuspinta-alaa ja siten suodatuksen tehokkuutta. Kalvojen likaantuminen ja tukkeutuminen aiheuttavat permeaatin laadun heikkenemistä, heikentävät suodatuksen tehokkuutta sekä nostavat energiankulutusta. Likaantuminen voidaan luokitella kolmeen ryhmään sen mukaan, miten vaikeasti poistettavaa likaa kalvojen pinnalla on: väliaikainen likaantuminen (*reversible fouling*), pysyvä likaantuminen (*irreversible fouling*) ja peruuttamaton likaantuminen (*irrecoverable fouling*). Kuvassa 26 on esitetty likaantumisen asteet. Väliaikaista likaantumista aiheuttaa pääasiassa kalvojen pintatukkeutuminen. Pysyvä likaantuminen on huokostukkeutumista sekä suodatuksen aikana kalvon pinnalle kiinnittynyttä likaa. Peruuttamaton likaantuminen aiheutuu kalvojen huokosten sellaisesta tukkeutumisesta,

ettei sitä voida poistaa puhdistusmenetelmillä. (Bodai 2018; Krzeminski 2013; Lignell et al. 2015)



Kuva 26. Kalvojen likaantumisen asteet (mukaillen Krzeminski 2013)

Kalvojen puhtaanapidolle on kaksi menetelmää: mekaaninen puhdistus sekä kemiallinen puhdistus. Mekaaninen puhdistus käsittää vastavirtahuuhtelun suodatussyklin sisällä sekä jatkuvan kalvoilmastuksen. Kemiallisia puhdistusmenetelmiä ovat viikoittain tehtävät ylläpitopesut sekä 1 – 2 kertaa vuodessa tehtävä voimakkaampi liuotuspesu. Vastavirtahuuhtelulla ja kalvoilmastuksella voidaan poistaa kalvojen väliaikaista likaantumista. Pysyvä likaantuminen ei poistu kalvojen pinnalta ja huokosista vastavirtahuuhtelulla tai kalvoilmastuksella, joten pysyvän likaantumisen poistamiseksi tarvitaan kemiallinen pesu. Kuvasta 26 huomaa myös pintatukkeutumisen ja huokostukkeutumisen erot. Väliaikaisessa likaantumisessa kalvojen pinnalle kertynyt aines tukkii huokokset kalvojen pinnalta, jolloin kyseessä on pintatukkeutuminen. Pysyvässä likaantumisessa näkyy myös huokostukkeutumista, jolloin kiintoaines, kolloidit, liukoiset ainekset ja orgaaniset yhdisteet, kuten rasva ja öljy, tukkivat huokosia myös niiden sisäpuolelta tarttumalla huokosten seinämiin. (Bodai 2018; Judd 2011; Lignell et al. 2015)

Likaantumisen ennaltaehkäisy on tärkeässä roolissa kalvojen suodatustehon ylläpitämisessä. MBR-prosessille on hyvin tärkeää tehokas esikäsittely. Taskilan MBR-yksikköön tuleva jätevesi on jo esikäsitelty hiekanerotuksessa, flokkauksessa ja esiselkeytyksessä. Lisäksi MBR-yksikön alussa on 2 mm:n hienovälvät, jotka ovat merkittävässä roolissa estämään kalvojen likaantuminen ja tukkeutuminen. Pahimmassa tapauksessa suuret partikkelit voivat aiheuttaa kalvojen rikkoontumisen tai kalvomodulien tukkeutumisen. Kalvomodulien tukkeutuminen aiheutuu kiintoaineksen kerääntymisestä kalvomodulien väliseen tilaan, jolloin kalvoilmastus ei tehoa tai



kalvoilmastuksen ilmastusaukot voivat jopa tukkeutua. Riittämätön esikäsittely tai kalvoilmastus voi aiheuttaa kalvomodulien tukkeutumista, kun heikosti biohajoava tai biohajoamaton aines kertyy lietteeseen ja takertuu kalvoihin. (Judd 2011; Lignell et al. 2015)

Vuon, TMP:n, permeabiliteetin ja kokonaisvastuksen arvojen tarkkailu on tärkeää, jotta kalvojen likaantuminen, tukkeutuminen tai jopa rikkoontuminen voidaan tunnistaa. Korkeampi TMP suodatuksen aikana viittaa likaantumiseen ja tukkeutumiseen, sillä tällöin tarvitaan suurempi paine suodatukseseen. Muita viitteitä likaantumiseen ja tukkeutumiseen ovat korkeampi kokonaisvastus sekä laskenut permeabiliteetti, jolloin kalvojen läpäisykyky on heikentynyt. Hetkellinen permeaatin laadun heikkeneminen, kuten korkeampi sameus tai kiintoainepitoisuus, ovat myös merkkejä likaantumisesta. (Bodai 2018)

Vastavirtahuuhtelu ja kalvoilmastus eivät yksistään riitä pitämään kalvoja puhtaana irrottamalla kiintoainesta kalvojen pinnalta, siksi käytössä on myös kemiallisia pesuja. Ylläpitopesu tulee suorittaa jokaiselle linjalle 1 – 3 kertaa viikossa. Lisäksi liuotuspesu suoritetaan jokaiselle linjalle 1 – 2 kertaa vuodessa suodatustehon palauttamiseksi. Ylläpitopesussa ja liuotuspesussa on valittavana käyttöön kahta kemikaalia riippuen likaantumisesta: natriumhypokloriitti ja sitruunahappo. Natriumhypokloriitti ( $\text{NaClO}$ ) on tehokas kemikaali orgaanisen lian poistoon ja sitruunahappo ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) tehoaa epäorgaaniseen likaan sekä saostumiin. (Bodai 2018)

### 7.6.1 Ylläpitopesu

Ylläpitopesu (*maintenance clean*, MC) suoritetaan MBR-linjoille viikkoaikataulun mukaan tai manuaalisesti käynnistettynä 1 – 3 kertaa viikossa. MBR-linja siirtyy ylläpitopesuun aina vastavirtahuuhtelun kautta. Kun viikkoaikataulun mukainen ylläpitopesun aika saavutetaan tai pesupyynti asetetaan linjalle manuaalisesti, linja siirtyy ylläpitopesusekvenssiin suodatussyklin päätteeksi vastavirtahuuhtelun jälkeen, jos sekvenssin aloitusehdot täyttyvät. Automaatiojärjestelmä sallii kuitenkin vain yhden linjan kerrallaan ylläpitopesuun, joten seuraavan linjan ylläpitopesu voi käynnistyä vasta, kun edellisen linjan pesu on suoritettu loppuun, vaikka linjoille tulisi pesupyynti yhtä aikaa. Ylläpitopesu ei vaikuta MBR-yksikön suodatuskapasiteettiin, sillä pesun aikana voidaan kolmen muun linjan permeaattivirtaamaa nostaa hetkelliseen maksimivirtaamaan PHF, jolloin ylläpitopesussa olevan linjan virtaama jaetaan muille suodatuksessa oleville

linjoille. Jos MBR-yksikön linjakohtainen permeaattivirtaama on yli keskivirtaaman, ylläpitopesua ei sallita, vaan pesupyynti jätetään aktiiviseksi, jolloin pesu käynnistyy vasta sitten, kun linjakohtainen permeaattivirtaama laskee takaisin keskivirtaamaan. Tällöin ylläpitopesussa olevan linjan virtaama voidaan jakaa muille linjoille, eikä MBR-yksikön suodatuskapasiteetti muutu ylläpitopesusta huolimatta. Jos ennen ylläpitopesua suodatuksessa on käytössä kaksi tai kolme linjaa, yhden linjan mennessä suodatuksesta ylläpitopesuun, nousee standby-tilassa oleva linja suodatukseseen. Ylläpitopesun päätyttyä linja menee joko standby-tilaan tai takaisin suodatukseseen, riippuen MBR-yksikön suodatintarpeesta.

Ylläpitopesuun on valittavissa kemikaaliksi natriumhypokloriitti tai sitruunahappo. Käytettävä kemikaali voidaan asettaa viikkokalenteriin tai valinta voidaan tehdä joka kerta erikseen manuaalisessa käynnistyksessä. Natriumhypokloriitin konsentraatioasetus ylläpitopesuun on 200 mg/l ja sitruunahapon 2 000 mg/l. Kemikaalin annostelu tehdään virtaamasuhdesäädöllä suhteessa ylläpitopesun aikaan vastavirtahuuhteluun siten, että konsentraatioasetus saavutetaan. Ylläpitopesussa suoritetaan useampia kemikaalin annostelusyklejä kalvoliuotuksella. Ennen kemikaaliannostelua linjalle tehdään kierrätys, jolloin linjan sulkuluukku on auki, kalvoilmastus päällä ja lietettä kierrätetään linjan läpi. Tämän jälkeen linjan sulkuluukku suljetaan ja aloitetaan kemikaalin annostelu sykleittäin. Ensimmäinen kemikaalilisäys kestää 60 sekuntia, jonka jälkeen tehdään 5 minuutin pituinen kalvoliuotus. Tämän jälkeen suoritetaan 5 – 8 annostelusykliä, missä tehdään 30 sekuntia kestävä kemikaalilisäys 5 minuutin kalvoliuotuksella. Kemikaaliannostelujen jälkeen suoritetaan 60 sekunnin mittainen vastavirtahuuhtelu ilman kemikaalilisäystä, jotta kemikaalit poistuisivat putkistosta. Tämän jälkeen ylläpitopesun viimeisenä vaiheena linjalle tehdään ilmahuuhtelu, jolloin käynnistetään kalvoilmastus. Kemikaalin annostelusykliden lukumäärä on muutettava asetusarvo. Käyttöönoton jälkeen kalvojen ollessa uusia niiden puhdistamiseksi on riittänyt viisi kemikaalin annostelusykliä, mutta syklien lukumäärää voidaan lisätä tarpeen mukaan tehokkaamman pesun aikaansaamiseksi.

Kemikaalilisäys tapahtuu kemikaalilinjoja pitkin permeaattilinjaan ylläpitopesun vastavirtahuuhtelun kanssa samanaikaisesti. Ylläpitopesun aikana vastavirtahuuhtelun virtaama-asetus on 245 m<sup>3</sup>/h. Kemikaali syötetään permeaattilinjaan kalvojen ja permeaattipumpun välille, joten kemikaali virtaa kalvoille permeaattiin sekoitettuna. Ylläpitopesun ollessa käynnissä yhdellä linjalla, estetään vastavirtahuuhtelu muille

suodatustoiminnassa olevilla linjoilla. Tällöin vastavirtahuuhtelun sijasta käytetään relaxsointia.

### 7.6.2 Liuotuspesu

Liuotuspesu (*recovery clean*, RC) suoritetaan jokaiselle linjalle 1 – 2 kertaa vuodessa. Se on tehokkaampi ja pitempi kestoisempi kemikaalipesu kuin ylläpitopesu, sillä liuotuspesu sisältää muun muassa altaan tyhjennyksen ja käsinpesun, jolloin kalvoallas täytetään kemikaalin lisäyksen avulla. Liuotuspesusekvenssi on niin sanottu puoliautomaattinen sekvenssi, sillä se käynnistetään manuaalisesti ja se sisältää käsin tehtäviä vaiheita. Ennen liuotuspesuun siirtymistä, linjan suodatussekvenssi pysäytetään ja pesusekvenssi käynnistetään suljetulle linjalle. Vain yhdelle linjalle kerrallaan voidaan suorittaa liuotuspesu.

Liuotuspesuun voidaan valita käytettäväksi kemikaaliksi natriumhypokloriitti tai sitruunahappo. Natriumhypokloriitin konsentraatioasetus liuotuspesussa on 1 100 mg/l ja sitruunahapon 2 200 mg/l. Kemikaaliannostelu tapahtuu vastaavalla tavalla kuin ylläpitopesussakin, virtaamasuhdesäädöllä suhteessa liuotuspesun vastavirtahuuhtelun virtamaan siten, että konsentraatioasetus saavutetaan. Samanaikaisesti liuotuspesun vastavirtahuuhtelun kanssa, muille suodatustoiminnassa olevilla linjoilla estetään vastavirtahuuhtelu ja sen tilalla tehdään relaxsointi.

Liuotuspesusekvenssi etenee puoliautomaattisesti käynnistyksen jälkeen. Sekvenssi sisältää kolme manuaalista sekvenssiaskelta, jotka vaativat käyttäjän kuittauksen ennen siirtymistä seuraavaan askeleeseen. Muut askeleet etenevät automaattisesti. Liuotuspesun alussa sulkuluukku suljetaan, jonka jälkeen tehdään ilmahuuhtelu. Tämän jälkeen alkaa manuaalisesti tehtävät vaiheet. Kalvoallas tyhjenetään käsin siirrettävällä tyhjennyspumppulla (uppopumppu). Altaan tyhjennys kestää noin 30 minuuttia. Kun allas on tyhjä, käyttäjä kuittaa ohjausjärjestelmästä tyhjennyksen valmiiksi, jolloin sekvenssi etenee seuraavaan askeleeseen. Altaan käsintyhjennyksen jälkeen on vuorossa altaan käsinpesu. Kalvoaltaan pohjalle ja seinille kertynyt liete irrotetaan esimerkiksi paloletkulla suihkuttamalla. Lisäksi kalvokasettien kehikot sekä kalvot voidaan huuhdella pienellä paineella varovasti. Kalvoja huuhdellessa tulee olla erittäin varovainen, etteivät kalvot vahingoitu. Altaan käsinpesun sekvenssiaskeleesta voidaan edetä seuraavaan askeleeseen käyttäjän kuittauksen jälkeen, kun käsinpesu on suoritettu. Käsinpesun jälkeen kalvoallas täytetään vastavirtahuuhtelun avulla virtaama-asetuksella 416 m<sup>3</sup>/h

asetettuun rajaan (2,6 metriä) asti. Altaan täyttö kestää noin 30 minuuttia, jonka jälkeen sekvenssi etenee automaattisesti ilmahuuhteluun, jonka tarkoituksena on sekoittaa kalvoaltaan sisältö ennen seuraavaa altaan tyhjennystä. Allas tyhjennetään manuaalisesti uudestaan tyhjennyspumpulla. Käsintyhjennyksen jälkeen käyttäjän tulee tarkistaa altaan puhtauden taso. Jos kalvoaltaassa on edelleen lietettä, käyttäjä kuittaa altaan ”ei puhtaaksi”, jolloin sekvenssi palaa takaisin altaan käsinpesuun. Jos käyttäjä kuittaa altaan ”puhtaaksi”, sekvenssi siirtyy eteenpäin.

Seuraavassa vaiheessa alkaa kemikaalihuuhtelusykli, jotka koostuvat kemikaalihuuhtelusta ja tauosta. Valittua kemikaalia annostellaan 2 minuutin kemikaalihuuhdelun ajan, jonka jälkeen on 2 minuuttia kestävä tauko. Tauon alussa ohjausjärjestelmä tekee tarkastelun altaan pinnasta. Jos kalvoaltaan pinta on alle asetetun rajan (2,5 metriä), sekvenssi siirtyy takaisin kemikaalihuuhdeluun tauon jälkeen. Jos kalvoaltaan pinta on yli asetetun rajan (2,5 metriä), sekvenssi etenee seuraavaan askeleeseen ilman taukoa. Kemikaalihuuhdelun jälkeen suoritetaan vastavirtahuuhdelu ilman kemikaalia, jolloin kalvoaltaan pinta nostetaan asetettuun rajaan (2,6 metriä) asti.

Tässä vaiheessa kalvoallas on täytetty valitulla kemikaalilla sekä permeaatilla. Seuraava vaihe on 4 tunnin mittainen kalvoliuotus, jonka aikana tehdään työ-/tauo-ohjauksella kalvoilmastusta. 55 minuutin välein kalvoilmastus käy päällä 5 minuutin ajan. Jos pesukemikaaliksi on valittu sitruunahappo, siirtyy sekvenssi automaattisesti 4 tunnin liuotusajan päätteeksi seuraavaan askeleeseen. Jos pesukemikaalina on käytetty natriumhypokloriittia, liuotusajan päätteeksi alkaa jatkuva kalvoilmastus, jonka tarkoituksena on neutraloida natriumhypokloriitti. Neutraloinnin jälkeen sekvenssi etenee käyttäjän kuittauksen jälkeen. Kalvoliuotuksen ja mahdollisen kloorin neutraloinnin jälkeen kalvoaltaan sulkuluukku aukaistaan ja lietteen annetaan kiertää kalvoaltaaseen 15 minuutin ajan. Kierrätyksen jälkeen sulkuluukku suljetaan ja linja ohjataan kiinni. Sekvenssin loputtua linjalla voidaan käynnistää suodatussekvenssi.

## 7.7 Kunnossapito

Kemikaalipesut sekä tärkeimpien tunnuslukujen seuraaminen ovat merkittävässä roolissa kalvojen toiminnan ylläpitämisessä. Näiden lisäksi voidaan säännöllisesti tai tarpeen vaatiessa aktiivilietteelle tehdä suodattuvuustestejä (TTF-testi), jotka mahdollistavat MBR-yksikön toiminnan tarkkailun eri näkökulmasta. Huolto- ja

kunnossapitotoimenpiteenä kalvojen kunto voidaan tarkistaa kuplatestin avulla, jolloin mahdolliset kalvorikot ja -vuodot on mahdollista paikallistaa. Kalvokaseteille olisi hyvä tehdä myös silmämääräistä tarkastelua niiden kunnosta, vaikka merkkejä toiminnan heikkenemiseen ei olisikaan. Tarkastelua voidaan tehdä esimerkiksi liuotuspesun yhteydessä, kun kalvoallas on tyhjennettynä.

MBR-linjan ollessa suljettuna, kalvokasetti voidaan nostaa ylös kalvoaltaasta huoltotasolle siltanosturilla. Kuitenkin on huomioitavaa, että kalvot eivät saa päästä kuivumaan huoltotöiden aikana. Yhtä modulia huollettaessa se voidaan upottaa veteen pieneen altaaseen, jossa voidaan tehdä kuplatestejä. Kalvokasetteja voidaan suihkuttaa kevyesti vedellä, jos ne ovat pois kalvoaltaasta useamman tunnin ajan. Tärkeintä on, että kalvot pysyvät jatkuvasti kosteina, eivätkä ne altistu auringonvalolle tai pakkaselle. Tämän vuoksi on suositeltavaa nostaa vain yksi kasetti kerrallaan kalvoaltaasta ja jättää muut kasetit kalvoaltaaseen upotettuina jäteveteen tai erityisimmissä tapauksissa puhtaaseen veteen. Kuivuessaan kalvon huokokset eivät enää palaudu entiselleen, jolloin kalvon suodatuskyky heikkenee. (Suez Water Technologies & Solutions 2017c)

### 7.7.1 TTF-testi

TTF-testillä (*Time to Filter*) voidaan testata aktiivilietteen suodattuvuutta. Testin tulos vastaa aikaa, joka vaaditaan suodattamaan tietty määrä vettä ennalta määrätystä määrästä aktiivilietettä. TTF-testi on tärkeä työkalu, jonka avulla voidaan parantaa ZeeWeed – kalvojen sekä MBR-yksikön toimintaa optimoimalla aktiivilietteen laatua. Aktiivilietteen heikko suodattavuus voi johtaa korkeisiin TMP-arvoihin sekä heikentää kalvojen permeabiliteettia. Kohonneet TMP-arvot ja heikentynyt permeabiliteetti eivät siis ole vain merkki likaantumisesta tai tukkeutumisesta, jolloin kalvosuodatuksen toiminnan taso voidaan palauttaa kemikaalipesujen avulla. Toisaalta aktiivilietteen heikko suodattavuus voi aiheuttaa kalvojen likaantumista ja tukkeutumista. Säännöllisesti tehtynä TTF-testillä voidaan seurata MBR-yksikön aktiivilietteen suodattavuuden laatua ilmastusaltaissa sekä kalvoaltaissa, jolloin kalvosuodatusprosessin toimintaa voidaan arvioida myös aktiivilietteen näkökulmasta. (GE Water & Process Technologies 2017)

TTF-testissä suodattaminen tapahtuu testivälineistöllä (kuva 27), johon kuuluvat tyhjiöpumppu, suodatinpaperi, buchner-suppilo, mittalasi sekä erlenmeyerkolvi. Mittalasi asetetaan erlenmeyerkolvin sisälle, jolloin voidaan tarkasti mitata suodatetun veden määrä. Buchner-suppiloon kaadetaan 200 ml aktiivilietettä, joko ilmastusaltailta

tai kalvoaltailta. Aktiivilietteen sisältämä vesi suodatetaan tyhjiöpumpun avulla. Suodatukseen kulunut aika kirjataan ylös, kun mittalasiin on suodattunut vettä 25 ml, 50 ml sekä 100 ml. Nämä vesimäärät vastaavat 12,5 %, 25 % sekä 50 % otetusta aktiivilietenäytteestä. Mitä kauemmin halutun vesimäärän suodatus kestää, sitä heikommin suodattuvaa aktiiviliete on. Tällöin alhainen TTF-tulos tarkoittaa helpommin suodattuvaa aktiivilietettä, jolloin kalvot voivat toimia alhaisissa TMP-lukemissa sekä korkeissa vuon arvoissa. (Bodai 2018; GE Water & Process Technologies 2017)



Kuva 27. TTF-testivälineistö

Suez Water Technologies & Solutions on antanut TTF-testien tuloksille viitearvot. Hyvin suodattuvalla aktiivilietteellä TTF-tulos 100 ml:n suodokselle on alle 100 sekuntia. Keskiverto TTF-tulos 100 ml:n suodokselle on 100 – 250 sekuntia. Hankalasti suodattuvan aktiivilietteen TTF-tulos 100 ml:n suodokselle on yli 250 sekuntia. TTF-tuloksia arvioidessa tulee kuitenkin huomioda, että TTF tulos on verrannollinen aktiivilietteen kiintoainepitoisuuteen. Korkeissa kiintoainepitoisuuksissa TTF-testin aikana muodostuu suodatinpaperin päälle vastustava kerros, jolloin TTF-arvo on suurempi kuin pienemmillä kiintoainepitoisuuksilla. (Bodai 2018; GE Water & Process Technologies 2017)

### 7.7.2 Kuplatesti

Jatkuva permeaatin laadun heikkeneminen tai paineen muutokset voivat olla merkki kalvojen rikkoontumisesta. Tämän vuoksi kalvojen suorituskkyä ja tärkeimpiä tunnuslukuja tulee tarkkailla. Kuplatesti on keino paikallistaa rikkoontunut ja vuotava kalvo. Kuplatestissä kalvot paineistetaan, jolloin kalvorikko näkyy vedessä kuplina. Testi perustuu siihen, että ehjä kalvohuokonen ei päästä ilmakuplia läpi, mutta laajentunut huokonen tai kalvorikko päästävät. Muodostuneiden kuplien koon ja määrän perusteella voidaan arvioida kalvojen kunto. (Bodai 2018)

Jos MBR-linjan kalvoissa epäillään kalvorikkoa, voidaan koko linjalle tehdä kuplatesti. Kalvoaltaan vedenpinta lasketaan kasettien yläosan tasolle, jolloin kuplat on helpompi havaita ja kalvorikko voidaan paikallistaa. Permeaattilinja paineistetaan kasettien ollessa vedessä ja muodostuneiden kuplien avulla voidaan paikallistaa kasetti ja moduli, jossa kalvorikko on. Tämän jälkeen kasetti nostetaan kalvoaltaasta huoltotasolle. Moduli voidaan irrottaa kasetista siihen tarkoitetulla työkalulla (kuvassa 28). Modulua irrottaessa ja etenkin siirrettäessä tarvitaan kaksi henkilöä, jotta modulua voidaan kantaa sen molemmista päistä.

Kasetista irrotetulle modulille voidaan suorittaa kuplatesti paineistamalla moduli sen molemmista päistä, jolloin vahingoittuneet kuidut voidaan tunnistaa ja eristää kalvojen paikkaamista varten. Modulille kuplatesti voidaan tehdä maassa puhtaalla alustalla, kuten kuvassa 29, tai moduli voidaan upottaa puhtaaseen veteen kuplatestiaaltaaseen. Maassa suoritettavassa kuplatestissä kalvorikon paikallistaminen vaatii spraytä kalvojen pinnalle, jolloin sprayn kupliminen ilmaisee vahingoittuneet kuidut. Altaassa tehtävässä kuplatestissä moduli upotetaan veteen vaakatasossa, jolloin kuplat on helpompi havaita.

Vastaavat kuplatestit suoritettiin kaseteille MBR-yksikön käyttöönottoaiheessa. Tällöin kalvojen kunto tarkastettiin niiden asennuksen jälkeen kalvorikkojen varalta.



Kuva 28. Modulin irrottaminen



Kuva 29. Modulille tehtävä kuplatesti maassa puhtaalla alustalla



### 7.7.3 Kuitujen paikkaaminen

Kuplatestin avulla paikallistettu kalvorikko tai katkennut kuitu voidaan paikata silikonilla. Rikkoontunut tai katkennut kuitu tulee ensin katkaista läheltä modulin jakotukkia molemmista päistä. Tämän jälkeen kuitu paikataan tukkimalla kuidun ontto sisäosa ruiskuttamalla sinne silikonilla (kuva 30). Ruiskun neulan kärki työnnetään kuidun sisälle ja silikonilla ruiskutetaan samalla kun neulan kärkeä vedetään ulos kuidusta. Tällä tavalla varmistetaan kuidun täyttyminen kokonaan silikonilla.



Kuva 30. Kuidun paikkaaminen silikonilla

## 8 PUHDISTUSTULOKSIA

MBR-yksikön puhdistustulosten säännöllinen seuraaminen aloitettiin lokakuun alussa, kun käyttöönoton loppuvaiheessa MBR-yksikkö aloitti toimintansa ympäri vuorokautisesti. Oulun Veden omavalvontalaboratoriossa tehtävän tutkimusohjelman mukaisten analyysien lisäksi ulkopuolisessa laboratoriossa analysoitiin bakteerinäytteitä MBR-yksiköstä sekä jälkisuodattimelta lähtevästä vedestä. Lokakuun lopussa Euroopan päästörekisterin E-PRTR mukaiset analyysit tulevasta ja lähtevästä vedestä teetettiin normaalia myöhemmin, jotta olisi mahdollisuus verrata MBR-yksiköstä ja jälkisuodattimelta lähtevän veden tuloksia keskenään. Tämän työn puhdistustuloksissa käsitellään omavalvontalaboratorion analyysijä lokakuusta joulukuun loppuun. Bakteerianalyysit on teetetty loka-marraskuun aikana.

Suez Water Technologies & Solutions on antanut puhdistustuloksille ja permeaatin laadulle omat viitearvot, jotka ZeeWeed –kalvoilla voidaan saavuttaa:

BOD	< 2,0 mgO <sub>2</sub> /l
Kiintoaine	< 2,0 mg/l
NH <sub>3</sub> -N	< 0,5 mg/l
Kok.N	< 3 mg/l
Kok.P	< 0,05 mg/l
Sameus	< 0,2 NTU (95 % ajasta)

MBR-yksikön permeaatin laadun tarkkailussa täytyy huomioida, että puhdistustuloksiin vaikuttaa aktiivilieteprosessin biologisen osan sekä kalvosuodatuksen toiminta. Koko MBR-yksikön eli esikäsitteilyn, ilmastuksen sekä kalvosuodatuksen, täytyy siis toimia hyvin, jotta jätevedenpuhdistus toimii ja permeaatin laatu täyttää viitearvot sekä laitokselle asetetut lupaehdot. (Bodai 2018; Suez Water Technologies & Solutions 2017b)

### 8.1 Omavalvonta-analyysit

Oulun Veden omavalvontalaboratorion tutkimusohjelma täydennettiin MBR-yksikön analyysien osalta lokakuun alussa. Lämpimän veden tutkimusohjelma on käytössä typenpoiston ollessa käynnissä, kun veden lämpötila on yli 12 °C. MBR-yksikön analyysillä täydennetty lämpimän veden tutkimusohjelma aloitettiin 8.10.2018 ja se

jatkui joulukuun loppuun, jonka jälkeen aloitettiin kylmän veden tutkimusohjelma. Tällöin analysoidaan kokonaistypen sekä ammonium- ja nitraattitypen esiintymistä tulevassa ja lähtevässä vedessä. Kylmän veden tutkimusohjelmassa ei tehdä laajaa tyyppianalyysia. MBR-yksikön käyttöönoton sekä puhdistustulosten laajemman seurannan vuoksi, lämpimän veden tutkimusohjelmaa jatkettiin vuoden loppuun saakka.

Tutkimusohjelmissa tehdään analyysijä tulevasta, esiselkeytetystä, jälkiselkeytetystä, jälkisuodattimelta lähtevästä, MBR-yksiköstä lähtevästä sekä lähtevästä jätevedestä, jossa yhdistyy molemmat lähtevät vedet. Näytteenoton viikkoaikataulu rakennettiin siten, että MBR-yksiköstä sekä jälkisuodattimelta lähtevälle vedelle tehtiin samat analyysit samoina päivinä. Lämpimän veden tutkimusohjelmaan kuuluivat seuraavat analyysit: kiintoaine,  $BOD_{7ATU}$ ,  $COD_{cr}$ ,  $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$ , kokonaistyyppi, fosfaattifosfori, kokonaisfosfori, alkaliteetti sekä pH. Tulevasta jätevedestä analysoitiin kiintoaine,  $BOD_{7ATU}$ ,  $COD_{cr}$ ,  $NH_4-N$ , kokonaistyyppi sekä kokonaisfosfori. Näytteenotto on toteutettu 24 h keräilynäytteinä automaattisilla näytteenottimilla.

Taulukossa 10 on esitettyä omavalvontalaboratoriossa tehtyjen analyysien tulokset loka-joulukuun aikana tulevalle jätevedelle, jälkisuodattimelta lähtevälle vedelle sekä MBR-yksikön lähtevälle vedelle. Tulokset on esitetty keskiarvoina näiden kolmen kuukauden tulosten perusteella. Lisäksi jälkisuodattimelta sekä MBR-lähtevälle vedelle on laskettu puhdistusteho tulevan jäteveden kuormasta. Taulukon oikeassa laidassa on Taskilan jätevedenpuhdistamolle annetut lupaehdot puhdistetulle jätevedelle.

Esitetyissä tuloksissa MBR-lähtevälle vedelle on kiintoaineelle ja kokonaisfosforille ilmoitettu kahdet tulokset: laboratorion analyysien keskiarvo sekä online-mittauksien keskiarvo. Kiintoaineen sekä kokonaisfosforin pitoisuudet MBR-yksikön permeaatissa ovat alhaisempia kuin laboratoriossa käytettyjen analyysimenetelmien määritysrajat. Tämän vuoksi taulukossa on esitetty myös online-mittauksien keskiarvo. Kokonaistypelle on esitetty tulokset loka-joulukuulta sekä ajanjaksolta lokakuusta 10.11. asti, jolloin veden lämpötila on ollut yli 12 °C ja typenpoiston velvoite voimassa.

Taulukko 10. Oulun Veden omavalvontalaboratorion tutkimusohjelman tulokset vuoden 2018 loka-joulukuussa

Analyysit	Tuleva jätevesi	Jälkisuodattimelta lähtevä	MBR-lähtevä	Lupaehdot
BOD <sub>7ATU</sub>	257,5 mg/l	50 mg/l	2,1 mg/l	≤ 15 mg/l
		80,6 %	99,2 %	≥ 90 %
COD <sub>cr</sub>	696 mg/l	113,7 mg/l	30,8 mg/l	≤ 125 mg/l
		83,7 %	95,6 %	≥ 75 %
Kiintoaine	560 mg/l	96,8 mg/l	< 2 mg/l (labra) 0,15 mg/l (online)	≤ 35 mg/l
		82,7 %	> 99,6 % (labra) 99,97 % (online)	≥ 90 %
Kokonaisfosfori	11,4 mg/l	1,91 mg/l	< 0,05 mg/l (labra) 0,04 mg/l (online)	≤ 0,5 mg/l
		83,3 %	> 99,6 % (labra) 99,7 % (online)	≥ 90 %
Kokonaistyyppi	71,3 mg/l	33,8 mg/l	37,8 mg/l	
		52,6 %	46,9 %	
Kokonaistyyppi, kun T > 12 °C	67,6 mg/l	31,8 mg/l	35,6 mg/l	≤ 20 mg/l
		53,0 %	47,3 %	≥ 70 %

MBR:n puhdistustulokset ovat yltäneet lupaehtoihin, kokonaistyyppiä lukuun ottamatta. BOD<sub>7ATU</sub>, COD<sub>cr</sub>, kiintoaine sekä kokonaisfosfori poistuvat kalvosuodatuksella yli 95 prosenttisesti. Lisäksi BOD<sub>7ATU</sub>:n, kiintoaineen ja kokonaisfosforin puhdistustulokset ylittävät Suez Water Technologies & Solutionsin antamiin viitearvoihin. Verrattaessa MBR-yksikön puhdistustuloksia perinteisen aktiivilieteprosessin tuloksiin, MBR:n puhdistustehokkuus on pääsääntöisesti selvästi korkeampi kuin perinteisen prosessin. Kuitenkin typenpoiston osalta perinteinen aktiivilieteprosessi toimi paremmin loka-joulukuussa kuin MBR-yksikkö, mikä johtunee MBR-yksikön myöhään syksyllä tapahtuneesta käyttöönotosta.

MBR-yksikkö otettiin ympäri vuorokautiseen käyttöön lokakuun alussa, jonka jälkeen myös ilmastusaltailla alkoi lietteen kierrätys. Ilmastusaltaiden prosessiolosuhteet eivät olleet vielä lokakuussa optimaaliset tutkimusohjelman alkaessa prosessin käynnistyessä.

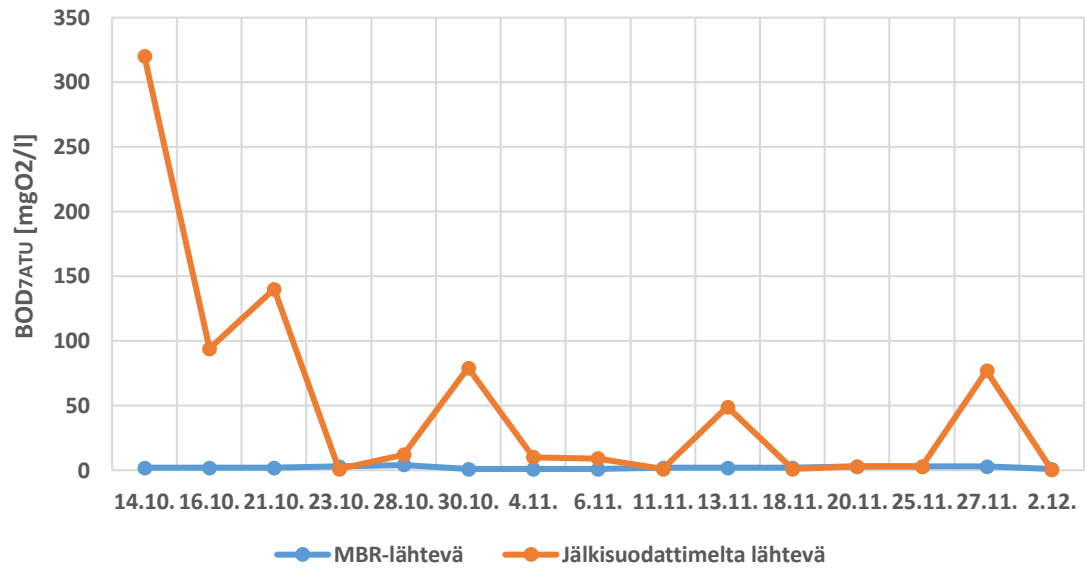
Myös perinteisen aktiivilieteprosessin puhdistustuloksiin on varmasti vaikuttanut MBR-yksikön käyttöönotto, sillä prosessin kuormitus muuttui MBR-yksikön johdosta, mikä muutti prosessiolosuhteita ilmastuslinjoilla 1 – 3. Lisäksi MBR-yksikön ilmastusaltaiden täyttöön käytettiin aktiivilietettä ilmastuslinjalta 3, joka on myös osaltaan vaikuttanut perinteisen aktiivilieteprosessin toimintaan.

### 8.1.1 BOD<sub>7ATU</sub> ja COD<sub>cr</sub>

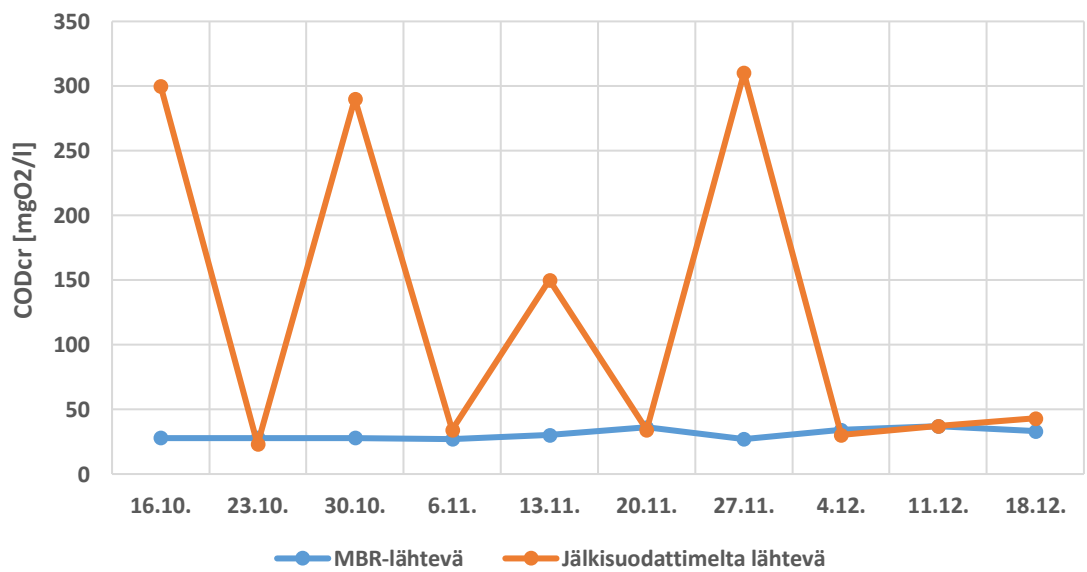
Orgaanisten aineiden poistaminen mitataan normaalisti biologisena hapenkulutuksena (BOD, *biological oxygen demand*) tai kemiallisena hapenkulutuksena (COD, *chemical oxygen demand*). BOD<sub>7</sub>-arvolla kuvataan jäteveden hapenkulutusta, joka vaaditaan seitsemän päivän aikana bakteerien hajottaessa jäteveden orgaanista ainesta. Vastaavasti COD-arvolla tarkoitetaan hapenkulutusta, kun jäteveden orgaaninen aines hajoaa kemiallisesti. Tällöin erottamalla mikro-organismeja ja bakteereja jätevedestä, orgaanisen aineen määrä vähenee, jolloin myös BOD ja COD vähenevät. (Judd 2011)

MBR-prosesseissa on yleisesti havaittu hyvät puhdistustehot COD<sub>cr</sub>:lle sekä BOD<sub>7ATU</sub>:lle (Krzeminski 2013). Taskilan MBR-yksiköllä loka-joulukuussa permeaatin COD<sub>cr</sub> pitoisuus oli keskimäärin 30,8 mg/l puhdistusteholla 95,6 %. Vastaavasti BOD<sub>7ATU</sub> pitoisuus permeaatissa oli keskimäärin 2,1 mg/l puhdistustehon ollessa jopa 99,2 %. BOD ja COD pitoisuudet MBR-yksikön permeaatissa ovat huomattavasti pienempiä kuin jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä. Tehokas BOD ja COD poistaminen jätevedestä kalvosuodatuksella selittyy kiintoaineen vähäisellä määrällä permeaatissa. Kalvosuodatus erottaa kiintoaineen, jolloin orgaaninen aines puhdistetussa vedessä vähenee. Tulosten perusteella permeaatti on liki kiintoainevapaata, jolloin myös BOD ja COD poistuvat tehokkaasti.

Kuvissa 31 ja 32 on esitetty loka-joulukuulta BOD<sub>7ATU</sub> sekä COD<sub>cr</sub> pitoisuudet jälkisuodattimelta ja MBR-yksiköstä lähtevästä vedestä. Kuvaajista nähdään, että MBR-yksikön tulokset ovat molemmilla yhdisteillä tasaisia, eivätkä ne poikkea paljoa keskiarvoista. Vastaavasti jälkisuodattimelta lähtevän veden BOD<sub>7ATU</sub> ja COD<sub>cr</sub> pitoisuudet riippuvat päivästä ja niiden tulokset vaihtelevat voimakkaasti. Ajoittain molempien yhdisteiden kohdalla jälkisuodattimelta lähtevän veden tulokset ovat vastaavia MBR-lähtevän tuloksien kanssa. Näiden perusteella MBR-prosessi toimii tasaisemmin kuin perinteinen aktiivilieteprosessi, eikä muutokset prosessissa ja prosessiolosuhteissa vaikuta BOD ja COD poistoon.



Kuva 31. BOD<sub>7ATU</sub> pitoisuus MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä

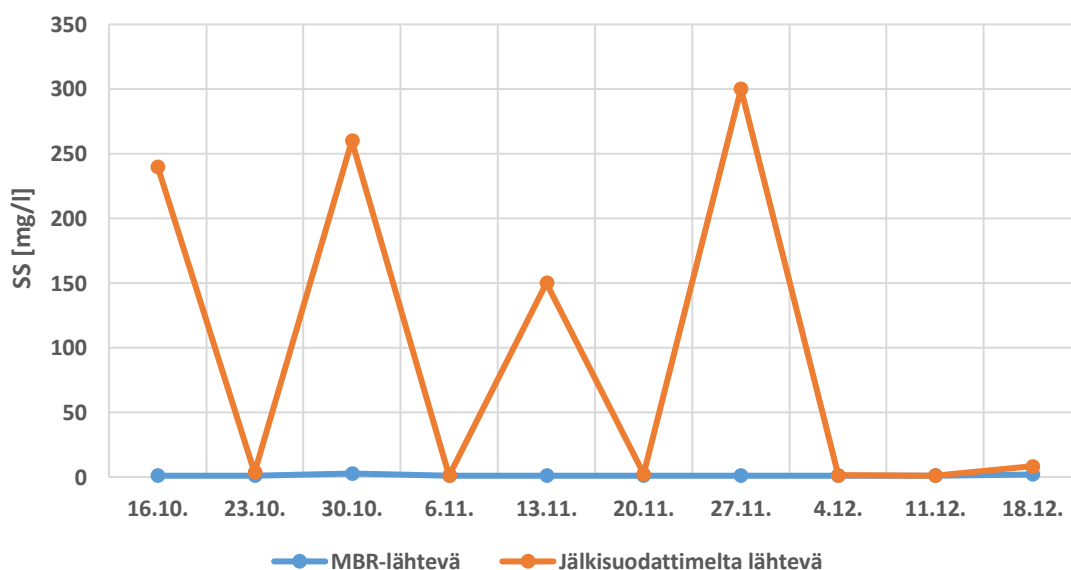


Kuva 32. COD<sub>cr</sub> pitoisuus MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä

### 8.1.2 Kiintoaine

ZeeWeed –kalvojen pienen huokoskoon  $0,04\ \mu\text{m}$  ansiosta, MBR-yksikön permeaatti on liki kiintoainevapaata. Käytännössä vain kolloidiset ja liuenneet aineet läpäisevät kalvot päätyen permeaattiin (Judd 2011). Taskilan MBR-yksikön kiintoainepitoisuudet ovat tyypillisiä MBR-kalvosuodatuksen tuloksia, jolloin pitoisuudet ovat niin pieniä, että niitä ei yleensä voida edes havaita laboratoriossa. Oulun Veden omavalvontalaboratorion analyysien perusteella MBR-lähtevässä vedessä oli alle  $2\ \text{mg/l}$  kiintoainetta loka-joulukuussa, mikä on alle käytetyn analyysimenetelmän määrittämissärajat. Online-mittauksen mukaan kiintoainepitoisuus permeaatissa oli keskimäärin  $0,15\ \text{mg/l}$  ja puhdistusteho jopa  $99,97\ \%$ .

Kuvassa 33 on esitetty MBR-lähtevän sekä jälkisuodattimelta lähtevän veden kiintoaineen pitoisuudet loka-joulukuussa. Vastaavalla tavalla kuin BOD ja COD poistossa, MBR-yksikön tulokset kiintoaineen osalta ovat tasaisia ja jälkisuodattimelta lähtevän veden tulokset vaihtelevat voimakkaasti. Orgaanisen aineen ja kiintoaineen poisto ovatkin linkittyneitä toisiinsa (Judd 2011). Jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä kiintoainepitoisuus vaihteli välillä  $< 2\ \text{mg/l}$  –  $300\ \text{mg/l}$ . Tulosten perusteella jälkisuodattimelta pääsee karkaamaan kiintoainetta aika ajoin, mikä vaikuttaa kiintoaineen sekä myös orgaanisen aineen tuloksiin. Kalvosuodatuksessa tällaista ongelmaa ei ole, jos kalvot vain pysyvät ehjinä.

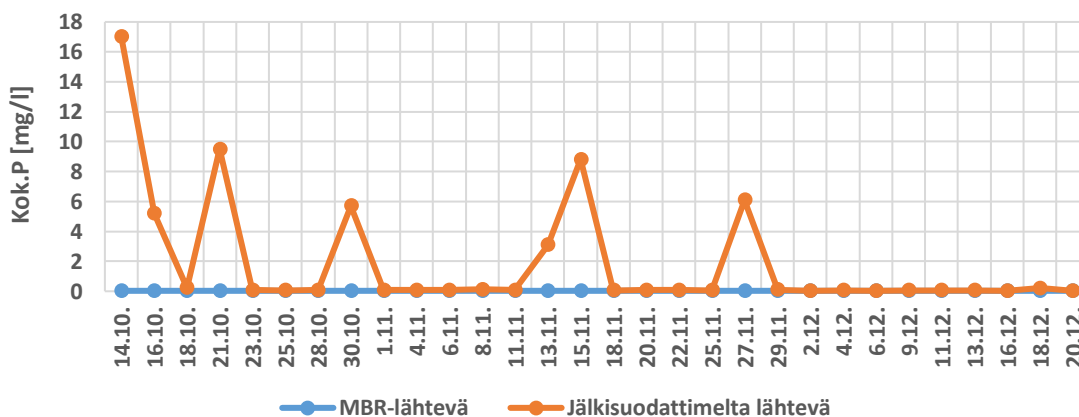


Kuva 33. Kiintoaineen pitoisuus MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä

### 8.1.3 Kokonaisfosfori

Perinteisessä aktiivilieteprosessissa sekä MBR-prosessissa, fosforin poistuminen riippuu biologisen prosessin ja kemiallisen saostamisen toiminnasta. Fosforinpoisto tapahtuu aktiivilieteprosessissa kaksivaiheisesti anaerobisissa ja aerobisissa olosuhteissa. Lietteeseen rikastuneiden poly-P-bakteerien avulla anaerobisissa olosuhteissa fosfaattia vapautuu lietteestä ja aerobisissa olosuhteissa fosfaatti sitoutuu lietteeseen, jolloin fosforia poistuu. Biologista fosforinpoistoa voidaan tehostaa saostamalla aktiivilietettä kemiallisesti. (Lignell et al. 2015; Rantanen et al. 1999)

Kuvassa 34 on esitetty kokonaisfosforin pitoisuus MBR-yksikön permeaatissa sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä loka-joulukuussa. Jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä kokonaisfosforin pitoisuus vaihteli lokakuun ja marraskuun aikana, jonka jälkeen joulukuussa pitoisuudet olivat MBR-yksikön tulosten kanssa miltei samalla tasolla, jopa alle määrittäysrajan 0,05 mg/l. Tulosten keskiarvo jälkisuodattimelta lähtevälle vedelle oli 1,91 mg/l ja puhdistusteho 83,3 %. MBR-yksiköllä omavalvontalaboratorion tekemät analyysit tuottivat tuloksen < 0,05 mg/l ja online-mittauksen mukaan kokonaisfosforin pitoisuus loka-joulukuussa oli keskimäärin 0,04 mg/l, jolloin puhdistustehoksi saatiin 99,7 %.



Kuva 34. Kokonaisfosforin pitoisuus MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä

Omavalvontalaboratorion tutkimusohjelmaan kuului myös liukoisen fosfaattifosforin ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) analyysit MBR-lähtevästä sekä jälkisuodattimelta lähtevästä vedestä. Molempien prosessien osalta fosfaattifosforin pitoisuudet olivat koko tutkimusjakson ajan alle analyysimenetelmän määrittäysrajan 0,05 mg/l. Kuitenkaan tulevasta jätevedestä



fosfaattifosforin pitoisuutta ei analysoida, joten liukoisen fosforin poistotehosta kalvobioreaktorissa tai perinteisessä aktiivilieteprosessissa ei voida tehdä päätelmiä. Perinteisessä aktiivilieteprosessissa jälkisuodattimilta on päässyt karkaamaan kiintoainetta, jolloin lähtevässä vedessä on ollut kiintoaineeseen sitoutunutta fosforia, jolloin kokonaisfosforin pitoisuus on ollut suurempi kuin MBR-yksikön permeaatissa. Yksi suurimmista huomioista fosforinpoistoon liittyen on se, että MBR-yksikössä ei ole tarvinnut käyttää saostuskemikaalia fosforinpoiston tehostamiseksi. Vastaavasti perinteisessä aktiivilieteprosessissa saostuskemikaalia on käytetty.

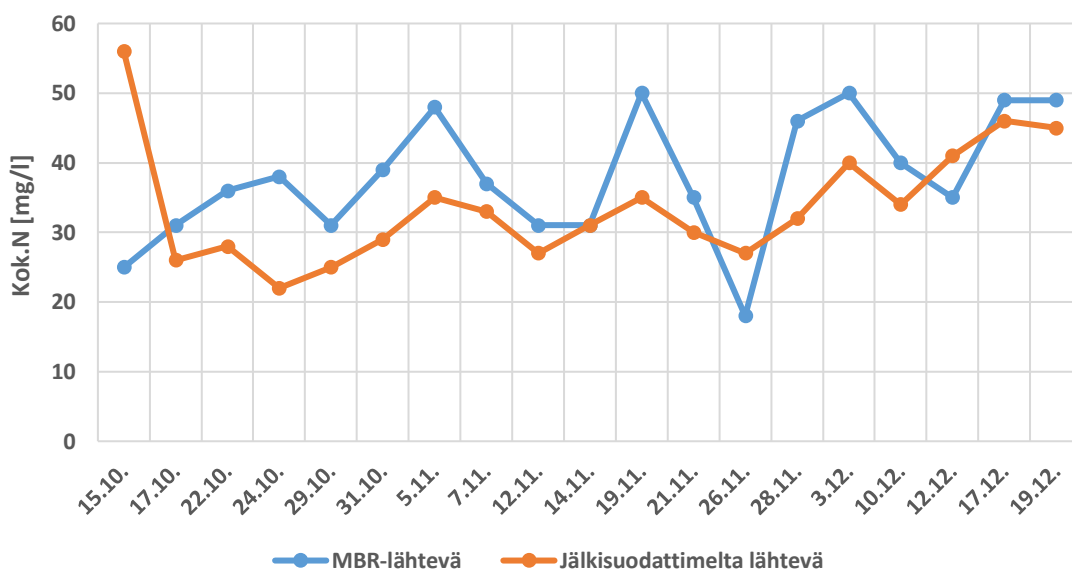
#### 8.1.4 Kokonaistyyppi

Typenpoisto ei yltänyt kummallakaan prosessilla lupaehtoihin ja lisäksi MBR-yksikön tulokset jäivät kauas Suez Water Technologies & Solutionsin antamasta kokonaistypen viitearvosta. Typen yhdisteet, ammoniumtyppi ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), nitraattityppi ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) sekä nitriittityppi ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), pääsevät liukoisessa muodossa ZeeWeed –kalvojen läpi, joten denitrifikaatio ja nitrifikaatio tulee saada toimimaan ilmastusaltaissa. Kuvassa 35 esitettyjen kokonaistypen pitoisuuksien perusteella denitrifikaatio-nitrifikaatio –prosessi on toiminut heikommin MBR-yksikössä kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa. Kokonaistyyppi on siis ainoa tarkastelluista yhdisteistä, jossa MBR-yksikön tulokset olivat heikompia kuin perinteisen prosessin tulokset.

Heikko typenpoisto molemmissa prosesseissa selittyy osaltaan MBR-yksikön myöhään syksyyn venyneellä käyttönotolla. MBR-yksikön ilmastusaltaiden prosessiolosuhteet ja bakteerikanta eivät olleet suotuisat typenpoiston lupaehtojen ollessa voimassa, kun veden lämpötila oli yli 12 °C. Tämä näkyy myös perinteisen aktiivilieteprosessin tuloksissa. MBR-yksikön ilmastusaltaiden täytössä käytettiin myös lietettä perinteisen aktiivilieteprosessin ilmastuslinjalta. Lisäksi esiselkeytyksestä tulevan jäteveden jakaminen myös MBR-yksikköön, muutti perinteisen aktiivilieteprosessin kuormitusta sekä ilmastusaltaiden olosuhteita.

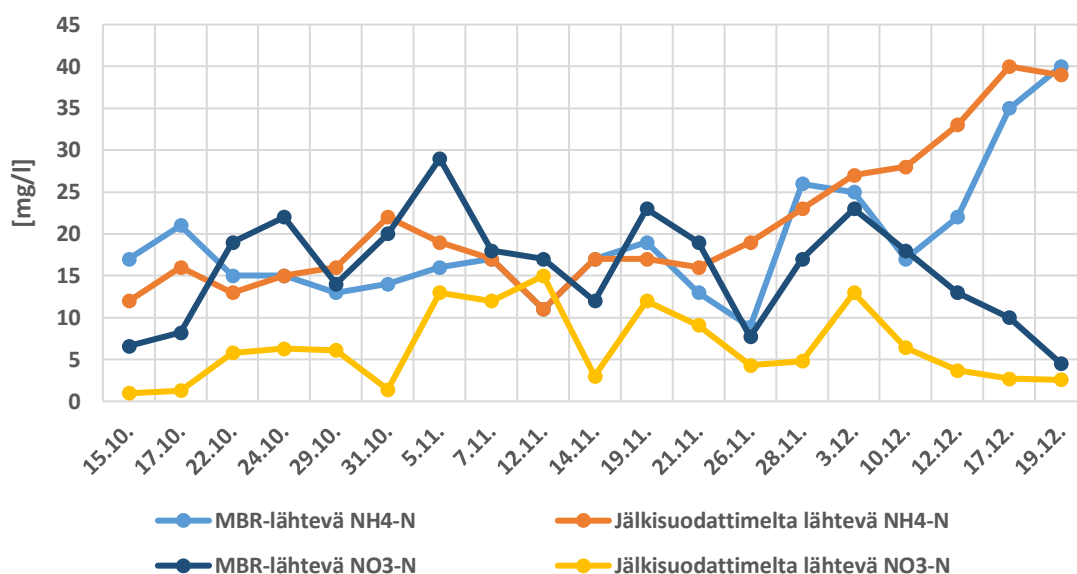
Veden lämpötila laski alle 12 °C 10. marraskuuta, jolloin typenpoiston velvoite päättyi. Kuvassa 35 voidaan nähdä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä kokonaistypen pitoisuuden nousu tämän jälkeen. MBR-yksikön tuloksissa selvää muutosta ei ole nähtävissä. Typenpoiston ollessa käynnissä MBR-yksikön kokonaistypen pitoisuus oli keskimäärin 35,6 mg/ ja puhdistusteho 43,7 %. Perinteinen aktiivilieteprosessi suoriutui typenpoistosta hieman paremmin, ja jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä kokonaistypen

pitoisuus oli keskimäärin 31,8 mg/l ja puhdistusteho 53,0 %. Jos tarkastelujaksoksi otetaan loka-joulukuu, MBR-yksikön permeaatissa kokonaistypen pitoisuus oli keskimäärin 37,8 mg/l puhdistusteholla 46,9 % ja jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä vastaavat arvot olivat 33,8 mg/l sekä 52,6 %.



Kuva 35. Kokonaistypen pitoisuus MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä

Omavalvontalaboratorion tutkimusohjelmaan kuului ammoniumtypen ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) ja nitraattitypen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) analyysit MBR-lähtevästä sekä jälkisuodattimelta lähtevästä vedestä. Kyseiset tulokset on esitetty kuvassa 36. Tuloksista nähdään typen yhdisteiden erilainen poistuminen kalvosuodatuksella ja perinteisellä aktiivilieteprosessilla. Jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä nitraattitypen pitoisuudet ovat huomattavasti alhaisempia kuin muiden typen yhdisteiden pitoisuudet molemmissa lähtevissä vesissä. Nitraattitypen pitoisuus jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä typenpoiston ollessa käynnissä oli keskimäärin 5,9 mg/l ja loka-joulukuun aikana 6,5 mg/l. MBR-lähtevässä vedessä nitraattitypen pitoisuus typenpoiston aikana oli keskimäärin 17,1 mg/l ja loka-joulukuussa 15,8 mg/l. Ammoniumtypen osalta tulokset olivat huomattavasti tasaisemmat. Ammoniumtypen pitoisuus jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä oli typenpoiston ollessa käynnissä keskimäärin 16,25 mg/l ja koko tutkimuskaudella 21,1 mg/l. MBR-yksikön permeaatissa ammoniumtypen pitoisuus oli typenpoiston aikana keskimäärin 16,0 mg/l ja vastaavasti loka-joulukuussa 19,0 mg/l.



Kuva 36. Ammoniumtypen  $\text{NH}_4\text{-N}$  ja nitraattitypen  $\text{NO}_3\text{-N}$  pitoisuudet MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä

Typenpoistossa nitrifikaatiossa ammoniumtyppi hapetetaan nitriitiksi ja edelleen nitraatiksi. Ammoniumtyypipitoisuudet MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä ovat liki saman suuruisia, mikä näkyy myös kuvan 36 käyrissä. Tällöin voidaan sanoa, että nitrifikaatio on toiminut tällä ajanjaksolla samalla tavalla molemmissa prosesseissa.

Denitrifikaatiossa nitriitti ja nitraatti pelkistetään typpikaasuksi. Jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä nitraattitypen pitoisuus on huomattavasti pienempi kuin MBR-yksikön permeaatissa. Tällöin nitraattityppeä on poistunut tehokkaammin perinteisessä aktiivilieteprosessissa, jossa denitrifikaatio on onnistunut paremmin kuin MBR-yksikössä, jos tarkastellaan nitraattitypen pitoisuuksia. Kuitenkin kokonaistypenpoistoon denitrifikaation sekä nitrifikaation on toimittava tehokkaasti.

## 8.2 Bakterianalyysit

Bakterianalyysijä teetettiin ulkopuolisella laboratoriollla lokakuun lopussa sekä marraskuun aikana. Kyseisellä ajanjaksolla otettiin yhteensä seitsemänä päivänä kertanäytteet MBR-lähtevästä sekä jälkisuodattimelta lähtevästä vedestä. Näytteistä tehtiin seuraavat analyysit mittaamaan jätevedenpuhdistuksen toimintatehokkuutta: *E. coli* (Colilert) (SFS-EN ISO 9308-2), suolistoperäiset enterokokit (SFS-EN ISO 7899-

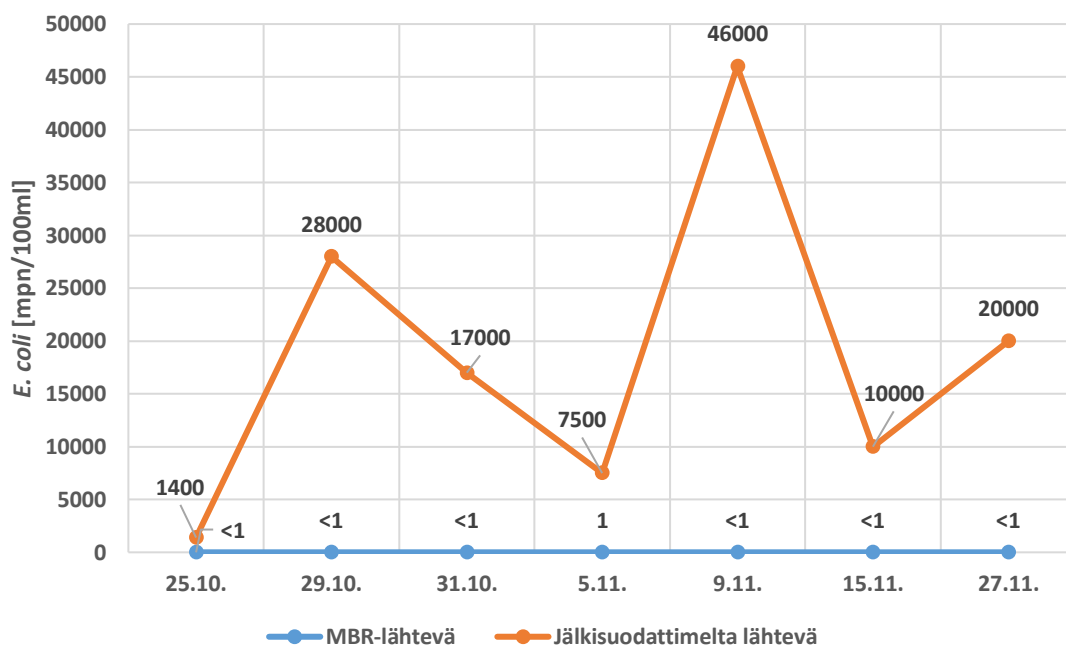
2), kokonaispesäkeluku + 22 °C (68 h) sekä kokonaispesäkeluku + 36 °C (44 h) (SFS-EN ISO 6222:1999).

MBR-kalvosuodatuksen on todettu poistavan tehokkaasti bakteereja sekä viruksia jätevedestä. Etenkin virusten poistossa, kalvosuodatuksen tehokkuus riippuu käytetystä kalvon huokoskoosta, sillä teoreettisesti virukset mahtuvat pienen kokonsa vuoksi kulkemaan huokosten läpi. (Ottoson et al. 2006; Radjenović et al. 2008) ZeeWeed 500D –onttokuitukalvojen huokoskoko on 0,04 µm, jolloin bakteerit ja osa viruksista suodattuisi huokoskoon perusteella. *E. coli* –bakteerin koko on noin 1 x 3 µm, ja suolistoperäisten enterokokkien noin 0,6 – 2,6 µm, jolloin huokoskoon perusteella tutkitut bakteerit voidaan suodattaa (Reshes et al. 2008; Hardy Diagnostics 1996). Lisäksi tutkimukset ovat osoittaneet, että huokoskokoa pienemmätkin virukset mahdollisesti suodattuvat kalvojen pinnalle muodostuneeseen kiintoaineskerrokseen tai ne ovat kiinnittyneinä suurempiin partikkeleihin, jolloin virukset suodattuvat niiden mukana (Radjenović et al. 2008). MBR-lähtevässä vedessä bakteerien määrän on todettu olevan hyvin pieni tai niitä ei ole havaittu lainkaan. Tämän lisäksi tutkimuksissa on osoitettu MBR-kalvosuodatuksen olevan tehokkaampi poistamaan bakteereja kuin perinteinen aktiivilieteprosessi. (Ottoson et al. 2006)

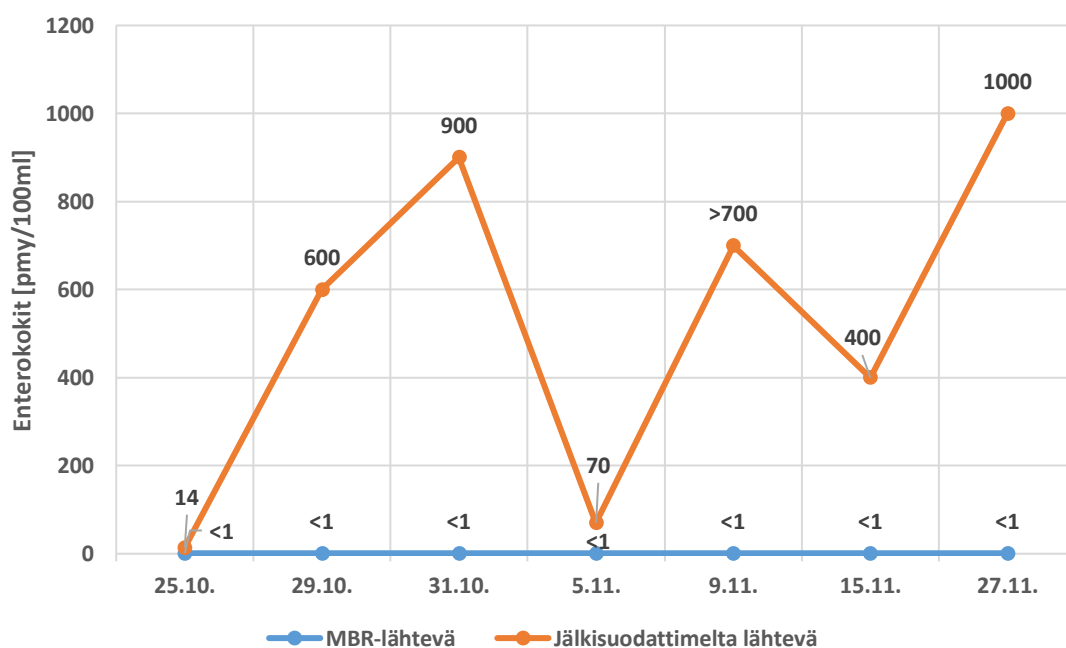
Analyysitulokset *E. coli* –bakteerin sekä suolistoperäisten enterokokkien esiintymisestä MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä on esitetty kuvissa 37 ja 38. *E. coli* –bakteerin osalta yhtä näytteenottokertaa lukuun ottamatta, *E. coli* –bakteerin esiintyminen oli alle 1 mpn/100 ml (mpn, todennäköisin lukumäärä, *most probable number*). Yhdellä näytteenottokerralla tulos oli 1 mpn/100 ml. Vastaavasti jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä *E. coli* –bakteerin esiintyminen vaihteli välillä 1 400 – 46 000 mpn/100 ml. Suolistoperäisten enterokokkien tulokset olivat samankaltaisia verrattuna *E. coli* –bakteerin tuloksiin. MBR-lähtevässä vedessä enterokokkien esiintyminen oli jokaisella näytteenottokerralla alle 1 pmy/100 ml (pmy, pesäkkeen muodostava yksikkö). Vastaavasti jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä enterokokkien esiintyminen vaihteli välillä 14 – 1 000 pmy/100 ml.

Jälkisuodattimelta lähtevän veden tuloksissa voidaan havaita *E. coli* –bakteerin sekä suolistoperäisten enterokokkien esiintymisissä samalainen trendi. Pääsääntöisesti molempien bakteerien esiintyminen oli pieni tai suuri samaan aikaan. MBR-yksikön permeaatin tulokset olivat tasaisia ja bakteereja ei juuri havaittu. Näiden tulosten

perusteella kalvosuodatuksella voidaan poistaa bakteereja tehokkaasti, tehokkaammin kuin perinteisellä aktiivilieteprosessilla.

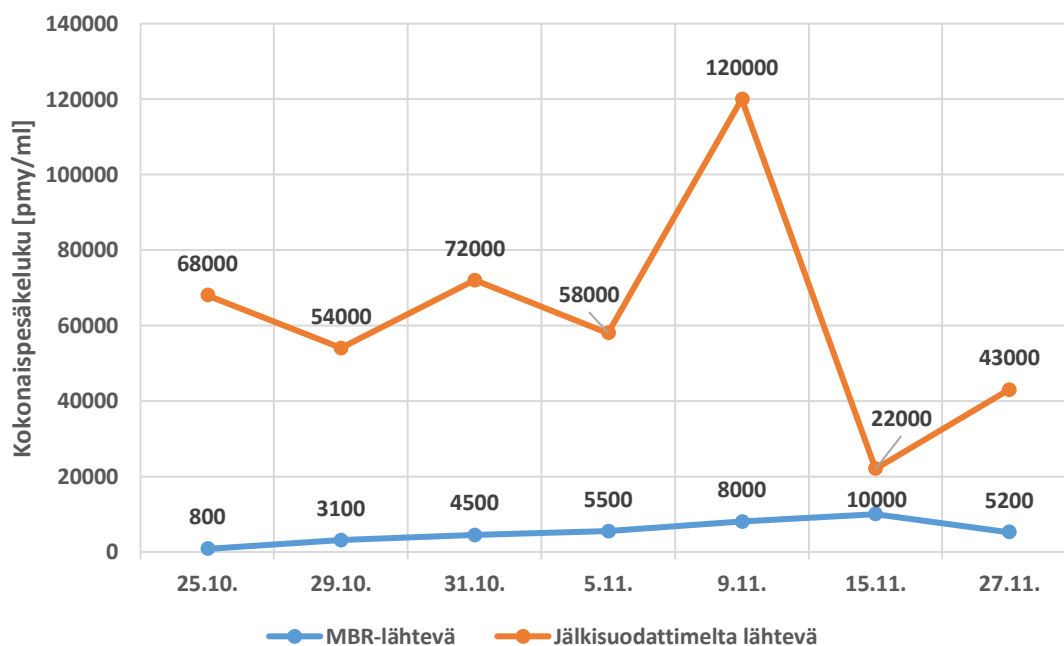


Kuva 37. *E.coli* -bakteerin (Colilert) esiintyminen MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä

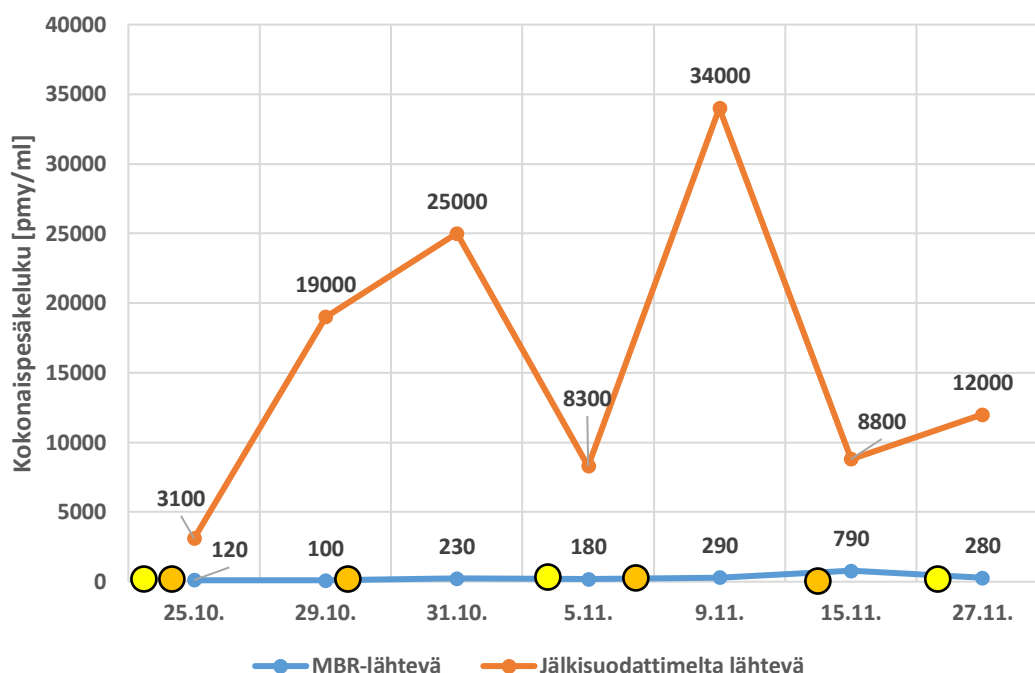


Kuva 38. Suolistoperäisten enterokokkien esiintyminen MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä

Analyysitulokset kokonaispesäkelukien lukumäärästä kahdessa eri lämpötilassa MBR-lähtevälle sekä jälkisuodattimelta lähtevälle vedelle on esitetty kuvissa 39 ja 40. MBR-lähtevän veden kokonaispesäkeluku (+ 22 °C, 68 h) vaihteli välillä 800 – 10 000 pmy/100 ml, ja jälkisuodattimelta lähtevän veden välillä 22 000 – 120 000 pmy/100 ml. Vastaavasti kokonaispesäkeluku (+ 36 °C, 44 h) vaihteli MBR-yksikön permeaatilla välillä 100 – 790 pmy/100 ml, kun jälkisuodattimelta lähtevällä vedellä tulokset olivat välillä 3 100 – 34 000 pmy/100 ml. Kokonaispesäkelukujen tulokset vaihtelivat molemmilla prosesseilla, jälkisuodattimelta lähtevän veden tulosten ollessa suurempia ja vaihdellessa suuremmalla välillä. Perinteisen aktiivilieteprosessin bakteerien esiintymisen sekä kokonaispesäkelukujen tulokset seuraavat samanlaista trendiä, jolloin kuvaajien muodot ovat samankaltaisia. MBR-yksikön tulokset kokonaispesäkelukujen osalta seuraavat toisiaan, mutta yhteyttä *E. coli* -bakteerin ja suolistoperäisten enterokokkien esiintymiseen ei voida nähdä, sillä bakteerien esiintyminen oli hyvin vähäistä.



Kuva 39. Kokonaispesäkeluku (+ 22 °C, 68 h) MBR-lähtevässä sekä jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä



Kuva 40. Kokonaispesäkeluku (+ 36 °C, 44 h) MBR-lähtevässä ja jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä sekä MBR-linjojen ylläpitopesut (sitruunahappo keltaisella ja natriumhypokloriitti oranssilla)

Bakteerianalyysseja varten otetut näytteet pyrittiin ottamaan siten, että voitaisiin nähdä tehtyjen ylläpitopesujen vaikutus MBR-lähtevän veden tuloksissa. Osa näytteistä on otettu natriumhypokloriitilla tehdyn ylläpitopesun jälkeen, osa sitruunahapolla tehdyn ylläpitopesun jälkeen ja osa viikonlopun jälkeen, jolloin edellisestä ylläpitopesusta on kulunut useampi päivä. Näytteenottokertoja edeltävät ylläpitopesut on merkitty kuvan 40 vaaka-akselille palloilla. Sitruunahapolla tehtyä ylläpitopesua kuvaa keltainen väri ja natriumhypokloriittia oranssi väri. MBR-lähtevän bakteerianalyysien tuloksista ei kuitenkaan voida nähdä pesujen vaikutusta, sillä selviä eroja näytteenottokertojen tuloksissa ei ole.

### 8.3 E-PRTR

E-PRTR on Euroopan päästörekisteri (European Pollutant and Transfer Register), jossa on tietoja 91 yhdisteen päästöistä ilmaan, veteen ja maaperään sekä tietoja jätteiden siirrosta. Rekisterin tavoitteena on lisätä yleistä tietoisuutta erilaisista ympäristökuormituksista. Lisäksi E-PRTR pyrkii edistämään teollisuuden tavoitteiden saavuttamista ympäristönsuojelussa ja kansainvälisten sopimusten velvoitteissa. IPPC-direktiivin nojalla annetun komission päätöksellä, EU:n jäsenmaiden tulee ilmoittaa ja

raportoida EU:n komissiolle päästötietoja E-PRTR –päättöksen toimialaluettelon mukaisista laitoksista. Ilmoitetut päästötiedot kootaan julkiseen E-PRTR –rekisteriin, jonka ylläpitäjänä toimii Euroopan ympäristökeskus (European Environment Agency, EEA). (Ympäristöhallinto 2019) Jätevedenpuhdistamot, jotka käsittelevät yli 100 000 asukkaan jätevedet, kuuluvat E-PRTR –rekisterin piiriin. (European Commission 2006)

Marraskuun 30. päivä Taskilan jätevedenpuhdistamolta otettiin näytteet tulevasta jätevedestä, MBR-lähtevästä, jälkisuodattimelta lähtevästä sekä yhdistetystä lähtevästä vedestä E-PRTR analyysijä varten. Näytteenotto toteutettiin kertaanäytteinä. Taulukossa 11 on esitetty osa tulevasta sekä puhdistetusta jätevedestä analysoidut yhdisteet ja tulokset.

Taulukko 11. E-PRTR –rekisterin mukaiset yhdisteet ja analyysitulokset Taskilan jätevedenpuhdistamon näytteistä 30.11.2018

Yhdiste	Tuleva jätevesi	MBR-lähtevä	Jälkisuodattimelta lähtevä	Lähtevä
Kloridi [mg/l]	39	97	87	91
Fluoridi [mg/l]	3,3	0,77	0,53	0,32
AOX [mg/l]	52	53	39	40
Kadmium, Cd [µg/l]	0,20	< 0,05	<0,05	< 0,05
Elohopea, Hg [µg/l]	0,17	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Nikkeli, Ni [µg/l]	11,2	4,4	7,4	6,5
Lyijy, Pb [µg/l]	3,5	< 0,1	< 0,1	0,21
Tributyyylitina [µg/l]	0,00050	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Diuron [µg/l]	< 0,100	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Dikloorimetaani [µg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Trikloorimetaani, kloroformi [µg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
4-tert-oktyylifenoli [µg/l]	0,14	0,060	0,040	0,050
BDE 99 [ng/l]	< 0,125	< 0,125	< 0,125	< 0,125
Dietyyliheksyyliatlaatti [µg/l]	7,4	< 0,30	< 0,30	< 0,30
Metyyliatlaatti (TCMTB) [µg/l]	< 0,10	< 0,01	< 0,01	< 0,01



Taulukossa esitettyjen yhdisteiden lisäksi analyysit on tehty seuraavista yhdisteistä, joilla on useampia esiintymismuotoja: alkyyliifenolit ja etoksylaatit, bromatut difenyylietterit (BDE), flataatit, kloorifenolit ja muut fenoliset yhdisteet, organotinat, tiatsolit, torjunta-aine GC monijäämä sekä torjunta-aine LC monijäämä. Näiden yhdisteiden esiintyminen tulevassa ja puhdistetussa jätevedessä oli hyvin pientä tai tulokset olivat alle käytetyn analyysimenetelmän määritysrajan.

E-PRTR –rekisteriin sisältyvien yhdisteiden esiintyminen sekä tulevassa että puhdistetussa jätevedessä on vähäistä ja monen yhdisteen kohdalla alle käytetyn analyysimenetelmän määritysrajan. Yhdisteissä, joiden pitoisuus voidaan määrittää, vain nikkelin pitoisuus on pienempi MBR-lähtevässä kuin jälkisuodattimelta lähtevässä tai lähtevässä vedessä. Kloridin, fluoridin, AOX:n sekä 4-tert-oktyyliifenolin pitoisuudet ovat MBR-lähtevässä vedessä korkeampia kuin jälkisuodattimelta lähtevässä vedessä. Kyseiset yhdisteet ovat veteen liukoisia tai osittain liukoisia yhdisteitä, joten niiden erottaminen kalvosuodatuksella on haasteellista.

## 9 YHTEENVETO

Syksyn 2018 aikana Oulussa Taskilan jätevedenpuhdistamolla otettiin käyttöön MBR-kalvotekniikka jäteveden puhdistamiseksi. MBR eli *membrane bioreactor*, kalvobioreaktori, yhdistää aktiivilieteprosessiin perustuvan orgaanisen aineen poiston sekä kalvosuodatuksen perustuvan mekaanisen lietteen erottamisen. Perinteisessä aktiivilieteprosessissa lietteen erottaminen tapahtuu jälkiselkeytyksessä laskeuttamalla. MBR-prosessissa suodatettu vesi voidaan johtaa sellaisenaan pois laitokselta puhdistettuna jätevetenä ja erotettu liete kierrätetään takaisin prosessiin.

Taskilassa MBR-yksikkö on otettu käyttöön perinteisen aktiivilieteprosessin rinnalle käsittelykapasiteetin lisäämiseksi sekä jätevedenpuhdistuksen tehostamiseksi. Vuorokauden keskivirtaama Taskilaan on noin 50 000 m<sup>3</sup>/vrk ja keskimäärin 35 % tulovirtaamasta käsitellään MBR-yksikössä. Laitokselle tuleva jätevesi johdetaan esikäsittelyyn ennen kuin jätevesi jaetaan perinteiseen ja MBR sekundäärikäsittelyyn. Esikäsittelyyn kuuluvat välppäys, hiekanerotus, flokkaus ja esiselkeytys. Esiselkeytetty vesi johdetaan perinteiseen sekundäärikäsittelyyn sekä MBR-yksikköön. Ennen mereen purkua perinteisessä prosessissa jätevesi käsitellään ilmastuksessa, jälkiselkeytyksessä sekä jälkisuodattimessa. MBR-yksikköön kuuluvat hienovälppäys, ilmastus sekä kalvosuodatus, jonka jälkeen puhdistettu vesi eli permeaatti johdetaan mereen.

Taskilan MBR-yksikössä on käytössä Suez Water Technologies & Solutions –kalvovalmistajan ZeeWeed 500D –kalvosuodattimet. ZeeWeed –kuidut ovat onttokuitukalvoja, jotka muodostuvat nylon –tukirakenteesta sekä PVDF –membraanista (PVDF eli polyvinyyliideenifluoridi). Membraanin huokoskoko on 0,04 µm (40 nm). Kalvot luokitellaan huokoskokonsa perusteella ultrasuodattimiksi, jotka suodattavat muun muassa bakteerit, solut, osan viruksista sekä kaikki huokoskokoa suuremmat hiukkaset, kiintoaineet ja kolloidit. Kuitenkaan liukoisia aineita kalvot eivät kykene poistamaan. Kalvot ovat upotettuina jäteveteen ja vesi imetään permeaattipumppujen avulla pienellä alipaineella kalvon läpi kuidun keskelle, jolloin suodatussuunta on kuidun ulkopuolelta kuidun sisälle.

MBR-yksikön tulovirtaama johdetaan esiselkeytyksestä hienovälppien läpi kahdelle ilmastusaltaille, joista liete nostetaan kuilupumpuilla neljälle MBR-linjalle. MBR-linjoilta liete kiertää ylivuotona takaisin ilmastusaltaille kierrätysuhteella 300 – 700 %.

Yhtäaikaisesti suodatuksessa toimii 2, 3 tai 4 MBR-linjaa plant demand –laskennan mukaan. PD-laskenta ohjaa kalvosuodatuslinjoja suodatuskäyttöön ja standby-tilaan eli lepotilaan ilmastusaltan pinnankorkeuden sekä suodatuskapasiteetin perusteella.

MBR-linjoilla suodatusta tehdään sykleittäin. Suodatussyklin kokonaispituus on 12 minuuttia, jossa suodatusta tapahtuu noin 11 minuutin ajan. Suodatuksen jälkeen permeaattilinjalle tehdään 15 sekuntia kestävä ilmanpoisto ennen 30 sekunnin vastavirtahuuhtelua tai vaihtoehtoisesti relaxointia. Vastavirtahuuhtelussa permeaattipumpun suunta käännetään kalvoille päin ja permeaattia pumpataan kalvojen läpi kalvoaltaisiin virtaamalla  $416 \text{ m}^3/\text{h}$ . Relaxointia voidaan käyttää vastavirtahuuhtelun sijasta, jolloin permeaattipumppu on pysähtynyt ja kalvot ovat levossa kalvoilmastuksessa. Vastavirtahuuhtelun tai relaxoinnin päätteeksi linja palaa takaisin suodatukseseen ja suodatussykli alkaa alusta.

Suodatuksessa on käytössä kolme lämpötila-aluetta, sillä veden lämpötila vaikuttaa kalvojen läpäisykykyyn eli permeabiliteettiin. Taskilan MBR-yksikön keskivirtaama on  $864 \text{ m}^3/\text{h}$  riippumatta veden lämpötilasta. Talvikaudella veden lämpötilan ollessa alle  $10^\circ\text{C}$ , MBR-linjakohtainen keskivirtaama-asetus on  $216 \text{ m}^3/\text{h}$ , jolloin MBR-yksikön keskivirtaama saavutetaan neljällä suodatinlinjalla. Välikaudella veden lämpötilan ollessa  $10^\circ\text{C} \leq T < 12^\circ\text{C}$  ja kesäkaudella veden lämpötilan ollessa  $\geq 12^\circ\text{C}$ , MBR-linjakohtainen keskivirtaama-asetus on  $288 \text{ m}^3/\text{h}$ . Tällöin MBR-yksikön keskivirtaama saavutetaan kolmella MBR-linjalla.

Kalvot ovat erityisen herkkiä suurille partikkeleille ja mekaaniselle kulutuksella. Tämän vuoksi hienovälppäys MBR-yksikön alussa on erityisen tärkeä vaihe kalvojen kunnon kannalta. Lisäksi kalvojen likaantuminen ja tukkeutuminen tulee estää, jotta suodatuksen tehokkuus ei laske. Suodatussyklin aikainen kalvoilmastus heiluttaa kalvoja, jolloin kiintoaine irtoaa kalvojen pinnalta. Lisäksi kalvoilmastus estää lietteen laskeutumisen ja tasoittaa lietepitoisuutta kalvoaltaassa. Suodatuksen jälkeinen vastavirtahuuhtelu irrottaa myös kalvojen pinnalle kertynyttä kiintoainetta huuhtomalla kalvoja permeaatilla. Lisäksi jokaiselle MBR-linjalle suoritetaan kemiallisia ylläpitopesuja 1 – 3 kertaa viikossa. Huoltotoimenpiteenä suoritetaan 1 – 2 kertaa vuodessa pidempi kemiallinen liuotuspesu jokaiselle linjalle. Pesukemikaaleina ovat käytössä natriumhypokloriitti orgaanisen lian poistoon sekä sitruunahappo epäorgaaniseen likaan ja saostumiin.

Loka-joulukuussa 2018 MBR-yksikön sekä jälkisuodattimelta lähtevän veden laatua tarkkailtiin muun muassa Oulun Veden omavalvontalaboratorion tutkimusohjelman sekä bakteerianalyysien avulla. MBR-yksikön puhdistustulokset ovat olleet erinomaisia ja puhdistustehot parempia kuin perinteisen aktiivilieteprosessin. Taskilan MBR-yksikön puhdistustulokset loka-joulukuussa ovat keskimäärin olleet: BOD<sub>7ATU</sub> 2,1 mgO<sub>2</sub>/l (poistoteho 99,2 %), COD<sub>cr</sub> 30,8 mgO<sub>2</sub>/l (poistoteho 95,6 %), kiintoaine < 2 mg/l (poistoteho > 99,6 %), kokonaisfosfori < 0,05 mg/l (poistoteho > 99,6 %) sekä kokonaistyppi 37,8 mg/l (poistoteho 46,9 %). MBR-yksikön puhdistustulokset olivat selvästi alle asetettujen lupaehtojen tarkasteluajanjaksolla kokonaistyyppiä lukuun ottamatta. Lisäksi bakteerianalyysien tulokset osoittivat, että *E. coli* -bakteerit ja suolistoperäiset enterokokit poistuvat tehokkaasti kalvosuodatuksella.

MBR-yksikön käyttöönotto vaati paljon hienosäätöä. Tekniikka ja automaatio on uutta ja hieman monimutkaisempaa kuin aikaisemmin Taskilan laitoksella. MBR-tekniikan automaatiojärjestelmä on rakennettu erityisesti suojelemaan kalvoja, jotta mahdolliset ongelmat prosessissa eivät vahingoita kalvoja tai pahimmassa tapauksessa aiheuta kalvojen rikkoontumista. Kalvojen kunnon ja puhdistustehokkuuden takaamiseksi kalvosuodatuksen ja sitä ympäröivän prosessin tulee toimia hyvin. Siksi laitoksen optimointia ja hienosäätöä tulee tehdä jatkossakin, jotta MBR-yksikkö ja perinteinen aktiivilieteprosessi toimivat mutkattomasti rinnakkain.

Tulokset ja kokemukset Taskilan, Parikkalan ja Viitasaaren MBR-laitoksilta osoittavat, että kalvosuodatus toimii tehokkaasti erilaisillakin ratkaisuilla niin pienemmässä kuin suuremmassakin mittakaavassa. MBR-tekniikka on osoittanut tehokkuutensa jätevedenpuhdistuksessa. Kalvojen elinikä voi olla jopa kymmenen vuotta tai ylikin, mikäli kalvot pysyvät ehjinä ja huokoset tukkeutumattomina. Tämän vuoksi hienovälppäys, kalvojen puhtaanapito sekä likaantumisen ja tukkeutumisen estäminen tulee suorittaa oikein ja tehokkaasti. Vuoden 2019 aikana kalvosuodatus tulee kokemaan Taskilassa Suomen erilaiset ilmasto-olosuhteet, eri lämpötilat, kevään kylmät sulamisvedet, kesäaikaisen typenpoiston sekä syyssateet. Seuraava vuosi näyttää MBR-tekniikan todellisen tehokkuuden erilaisissa olosuhteissa. Alku näyttää kuitenkin jo todella lupaavalta.

## LÄHTEET

Aluehallintovirasto, 2017. Taskilan jätevedenpuhdistamon ympäristölupa, Oulu. Lupapäätös Nro 53/2017/1, 124 s.

Bodai, T., 2018. Oulu Taskila Municipal WWTP Treatment system training. Koulutusmateriaali, Taskila WWTP training I – III. Julkaisematon materiaali.

European Commission, 2006. Guidance Document for the implementation of the European PRTR [verkkodokumentti]. European Commission, 142 s. Saatavilla: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B1D6322BC-028D-428A-ADC4-8F20F3FD3589%7D/94677> [viitattu 6.1.2019].

FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy, 2016. Taskilan jätevedenpuhdistamon tehostamisen yleissuunnitelma. FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy, 35 s. Julkaisematon materiaali.

GE Water & Process Technologies, 2017. SERV-0042 Sludge Quality – Time to Filter Procedure. GE Water & Process Technologies, 11 s. Julkaisematon materiaali.

Gerardi, M., 2006. Wastewater Bacteria. USA, Wiley-Interscience, 255 s. ISBN 978-0-471-20691-0

Grady, C. P., Daigger, G., Love, N., Filipe, C., 2011. Biological Wastewater Treatment, 3 painos. USA, CRC Press, 991 s. ISBN 978-0-8493-9679-3

Gray, N. F., 2010. Water Technology – An Introduction for Environmental Scientists and Engineers, 3 painos. Iso-Britannia, IWA Publishing, 747 s. ISBN 978-1-85617-705-4

Haimi, H., 2018. Leap-testauksesta / about Leap testing [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Risteelä Sofia. Lähetetty 3.10.2018 klo 23:26 (GMT+0200)

Hardy Diagnostics, 1996. Enterococcus [verkkodokumentti]. Saatavilla: [https://catalog.hardydiagnostics.com/cp\\_prod/Content/hugo/Enterococcus.htm](https://catalog.hardydiagnostics.com/cp_prod/Content/hugo/Enterococcus.htm) [viitattu 7.1.2019].

Hyxo Oy (toim.) 2018a. Jätevedenkäsittelylaitoksen UF reaktori – Käyttöohjeet. Alkuperäinen julkaisu: GE Water & Process Technologies, Control Narrative. Julkaisematon materiaali.

Hyxo Oy (toim.), 2018b. ZeeWeed 500D Käyttö- ja huolto-ohjeet. PR16117 ZeeWeed manuaali. Alkuperäinen julkaisu: GE Water & Process Technologies, ZeeWeed 500D Manual. Julkaisematon materiaali.

Judd, S., 2011. The MBR Book – Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment, 2 painos. Iso-Britannia, IWA Publishing, 519 s. ISBN 978-1-84-339518-8

Judd, S., Jefferson, B., 2003. Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use. Iso-Britannia, Elsevier Advanced Technology, 291 s. ISBN 1-85617-389-5

Judd & Judd Ltd, 2018a. The MBR Site, Interactive map: History of municipal membrane bioreactor installations [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/interactive-map-history-of-municipal-mbr-installations/> [viitattu 29.11.2018].

Judd & Judd Ltd, 2018b. The MBR Site, MBR membrane technology configurations [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/membrane-technology-configurations-in-membrane-bioreactors/> [viitattu 4.12.2018].

Judd & Judd Ltd, 2018c. The MBR Site, MBRs for municipal wastewater treatment [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/membrane-bioreactors-for-municipal-wastewater-treatment/> [viitattu 29.11.2018].

Judd & Judd Ltd, 2018d. The MBR Site, Membrane Bioreactors – flat sheet configurations [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/mbr-flat-sheet-configurations/> [viitattu 4.12.2018].

Judd & Judd Ltd, 2018e. The MBR Site, Membrane Bioreactors – hollow fibre configurations [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/mbr-hollow-fibre-configurations/> [viitattu 4.12.2018].

Judd & Judd Ltd, 2018f. The MBR Site, Membrane Bioreactors – multitube configurations [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/mbr-multitube-configurations/> [viitattu 4.12.2018].

Judd & Judd Ltd, 2018g. The MBR Site, Membrane separation process configurations in MBRs [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.thembrsite.com/membrane-separation-process-configurations-in-membrane-bioreactors/> [viitattu 4.12.2018].

Krzeminski, P., 2013. Activated sludge filterability and full-scale membrane bioreactor operation, väitöskirja [verkkodokumentti]. Puola, Technische Universiteit Delft, 277 s. ISBN/EAN 978-94-6186-092-7. Saatavilla: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aec4e0320-82c8-42df-8b51-b616314ac96f> [viitattu 4.12.2018].

Lehtniemi, L., 2004. Pienpuhdistamoiden toimivuus ja typenpoisto. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen moniste 9/2004, Turku, 89 s.

Lignell, I., 2018. Viitasaaren MBR [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Sofia Risteelä. Lähetetty 11.12.2018 klo 10.48 (GMT +0200)

Lignell, I., Mikola, A., Venejärvi, V., 2015. MBR-opas – MBR-prosessien suunnittelu, ohjaus ja hankinta Suomessa [verkkodokumentti]. Ramboll Finland Oy, 69 s. Saatavilla: [https://vvy.etapahtuma.fi/eTaika\\_Tiedostot/5/Hanke/1371/LOPPURAPORTTI\\_MBR\\_opas\\_Ramboll\\_Finland.pdf](https://vvy.etapahtuma.fi/eTaika_Tiedostot/5/Hanke/1371/LOPPURAPORTTI_MBR_opas_Ramboll_Finland.pdf) [viitattu 27.11.2018].

Ottoson, J., Hansen, A., Björlenius, B., Norder, H., Stenström, T.A., 2006. Removal of viruses, parasitic protozoa and microbial indicators in conventional and membrane processes in a wastewater pilot plant. Water Research, 40 (7), 1449-1457, 9 s.

Oulun Vesi, 2012. Taskila – Oulun Veden jätevedenpuhdistamo. Esite.

Oulun Vesi, 2018. Oulun Vesi vuosikertomus 2017, 31 s.

Palmunen, P., 2018. Taskilan jätevedenpuhdistamon MBR-yksikkö – Automaation toimintaselostus rev L (13.8.2018). FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy, 144 s. Julkaisematon materiaali.

Pinnekamp, J., Friedrich, H., 2003. Membrane Technology for Waste Water Treatment, 2 painos [verkkodokumentti]. Saksa, Institute of Environmental Engineering of the RWTH Aachen University & Ministry for Environment and Nature Conservation, Agriculture and Consumer Protection of federal state North Rhine-Westphalia, 346 s. Saatavilla: [https://www.fiw.rwth-aachen.de/neo/fileadmin/pdf/membranbuch/GB\\_Membranbuch\\_300106.pdf](https://www.fiw.rwth-aachen.de/neo/fileadmin/pdf/membranbuch/GB_Membranbuch_300106.pdf) [viitattu 26.11.2018].

Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto, 2004. Oulun kaupungin jätevedenpuhdistamon ympäristölupa, Oulu, Haukipudas, Oulunsalo, Kempele, Hailuoto, Liminka, Lumijoki ja Siikajoki. Ympäristölupapäätös Nro 49/04/2, 57s.

Radnejović, J., Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M., Barceló, D., 2008. Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology [verkkodokumentti]. Hdb Env Chem Vol. 5, Part S/2 (2008), 37-101, 66s. Saatavilla: [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/RADJENOVIC%202008%20MBR%20as%20an%20Advanced%20Wastewater%20Treatment%20Technology.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/RADJENOVIC%202008%20MBR%20as%20an%20Advanced%20Wastewater%20Treatment%20Technology.pdf) [viitattu 6.1.2019].

Rantanen, P., Aurola, A-M., Hakkila, K., Hernesmaa, A., Jørgensen, K., Laukkanen, R., Melasniemi, H., Meriluoto, J., Nikander, S., Pelkonen, M., Renko, E., Valve, M., Pauli, A., 1999. Biologisen fosforin- ja typenpoiston tehokkuus, prosessiohjaus ja mikrobiologia. Suomen ympäristökeskuksen julkaisu Nro 318. Helsinki, Oy Edita Ab, 153 s. ISBN 352-11-0508-9

Reshes, G., Vanounou, S., Fishov, I., Feingold, M., 2008. Cell Shape Dynamics in *Escherichia coli*. Biophysical Journal, 94 (1), 251-264, 14 s.

Singh, R., 2015. Membrane Technology and Engineering for Water Purification – Application, Systems Design and Operation, 2 painos. USA, Butterworth-Heinemann, 452 s. ISBN 978-0-444-63362-0

Suez Water Technologies & Solutions, 2017a. ZeeWeed\* 500D module fact sheet [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.suezwatertechnologies.com/products/ultrafiltration/zeeweed-500-membrane> [viitattu 10.12.2018].



Suez Water Technologies & Solutions, 2017b. ZeeWeed\* membranes for municipal wastewater treatment [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.suezwatertechnologies.com/kcpguest/document-library.do?jsessionid=1C6AEB52C5D6431728DE7722790FA184.watapp10-p03i> [viitattu 1.1.2019].

Suez Water Technologies & Solutions, 2017c. SERV-0001 ZeeWeed Membrane Care, Handling, and Storage 500c, 500d, 700b, ZW1000, ZW1500, Zeeblok. Suez Water Technologies & Solutions, rev P, 10s. Julkaisematon materiaali.

Säylä, J., Vilpas, R., 2012. Yhdyskuntien jätevesien puhdistus 2010. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 21/2012, Helsinki, 30 s. ISBN 978-952-11-4067-9

Venejärvi, V., 2019. Parikkalan MBR [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Sofia Risteelä. Lähetetty 15.1.2019 klo 9.42 (GMT +0200)

Yao, Q., Peng, D-C., 2017. Nitrite oxidizing bacteria (NOB) dominating in nitrifying community in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants. *AMB Express*, 7(1), 25 s.

Ympäristöhallinto, 2019. Päästörekitrit – Euroopan päästörekitriti E-PRTR [verkkodokumentti]. Saatavilla: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi\\_luvat\\_ja\\_ymparistovaikutusten\\_arviointi/Luvat\\_ilmoitukset\\_ja\\_rekisterointi/Paastotiedon\\_ilmoittaminen\\_paastorekistereihin\\_PRTR/Paastorekitrit](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Paastotiedon_ilmoittaminen_paastorekistereihin_PRTR/Paastorekitrit) [viitattu 6.1.2019].

Ympäristöministeriö, 2006. Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 888/2006.